

GERSON LINDNER

**USO DE MODELO REDUZIDO PARA PESQUISA E
DESENVOLVIMENTO DE BLOCOS CERÂMICOS
ESTRUTURAIS**

**Dissertação apresentada ao Curso de Pós-
Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal de Santa Catarina,
como parte dos requisitos para a obtenção
do título de Mestre em Engenharia Civil.**

Florianópolis

2001

**USO DE MODELO REDUZIDO PARA PESQUISA E
DESENVOLVIMENTO DE BLOCOS CERÂMICOS
ESTRUTURAIS**

GERSON LINDNER

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientador: Prof. Humberto Ramos Roman, Ph.D

Florianópolis

2001

LINDNER, Gerson. *Uso de modelo reduzido para pesquisa e desenvolvimento de blocos cerâmicos estruturais*. Florianópolis, 2001, 95 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Humberto Ramos Roman, Ph.D.

Defesa: 06/04/2001

Foram desenvolvidos procedimentos de fabricação de blocos cerâmicos estruturais em laboratório e foi avaliado o comportamento de modelos de blocos cerâmicos em escala reduzida submetidos à ensaios de compressão axial. A influência de diversas variáveis de fabricação nas características físicas e mecânicas das unidades foi avaliada. Para viabilizar a fabricação de blocos cerâmicos em laboratório, foi utilizado um fator de escala 1/3. Um estudo de caso foi realizado para avaliar a influência do fator de escala reduzida no comportamento de componentes de alvenaria de blocos cerâmicos. Foram desenvolvidas quatro diferentes geometrias de blocos e ensaios de resistência à compressão de unidades, argamassas, prismas e paredinhas foram realizados. Analisou-se a influência da geometria dos blocos na resistência à compressão de elementos de alvenaria.

Palavras chave: bloco cerâmico, alvenaria estrutural, escala reduzida, modelagem

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação defendida e aprovada em 06 / 04 / 2001,
pela comissão examinadora.

Prof. Humberto Ramos Roman, Ph.D – Orientador – Moderador

Prof. Dr. Flávio Antônio dos Santos

Prof. Dr. Luis Alberto Gomez

Prof. Dr. Orestes Estevam Alarcon

Prof. Philippe Gleize, Ph.D.

Prof. Dr. Jucilei Cordini – Coordenador do CPGEC

*Este trabalho é dedicado ao meu Pai,
Gerhard Lindner, pelo seu esforço e
dedicação para que meus objetivos fossem
alcançados; e à minha Mãe, Roza Lindner,
pelo carinho e dedicação.*

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Humberto Ramos Roman, pelo apoio e incentivo para a realização desta dissertação.

À Cerâmica Bosse, pelo fornecimento de toda a argila e dos moldes necessários ao desenvolvimento do trabalho.

Aos colegas e amigos: Gihad Mohamad, Ricardo Kuerten, Ildo Sponholz, Cristine do Nascimento Mutti, Leslie Roman, Sofia Laurindo Machado e Flavio dos Santos.

Aos técnicos do Laboratório de Materiais de Construção Civil: Renato Lapa e Luiz Henrique.

Aos bolsistas Alessandro e Marcelo, pela participação no desenvolvimento do trabalho de laboratório.

À CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, cujo programa de financiamento possibilitou a conclusão deste trabalho.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	iv
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xi
LISTA DE SÍMBOLOS	xii
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVO PRINCIPAL	3
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1. O SETOR DE CERÂMICA VERMELHA NO BRASIL	6
2.2. PROCESSO DE FABRICAÇÃO	7
2.2.1. Extração e Estocagem de Matéria Prima	7
2.2.2. Preparação da Massa Cerâmica	9
2.2.3. Moldagem por Extrusão.....	9
2.2.4. Secagem.....	10
2.2.5. Queima.....	10
2.2.6. Defeitos de Fabricação.....	12
2.3. PESQUISAS COM MODELOS EM ESCALA REDUZIDA.....	14

3. PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE BLOCOS CERÂMICOS EM LABORATÓRIO	17
3.1. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL UTILIZADO.....	17
3.1.1. Análise Química	18
3.1.2. Análise Granulométrica	18
3.1.3. Limites de Liquidez e Plasticidade da Argila	19
3.2. UNIDADES	20
3.3. MOLDES.....	21
3.4. PROCESSO DE FABRICAÇÃO DOS BLOCOS	23
3.4.1. Moagem, Correção da Umidade e Homogeneização.....	24
3.4.2. Extrusão	26
3.4.3. Secagem.....	28
3.4.4. Queima.....	29
3.5. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS BLOCOS.....	30
3.5.1. Umidade de Moldagem.....	30
3.5.2. Retração Linear de Secagem.....	31
3.5.3. Perda ao Fogo	31
3.5.4. Retração Linear de Queima	32
3.5.5. Absorção de Água.....	32
3.5.6. Massa Específica Aparente e Área Líquida.....	32
3.5.7. Resistência à Compressão na Área Bruta	33
4. ESTUDO DE CASO: INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DOS BLOCOS NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	34
4.1. UNIDADES	34
4.2. FABRICAÇÃO DOS BLOCOS.....	36
4.3. ARGAMASSA.....	37
4.4. PRISMAS	40
4.5. PAREDINHAS.....	41
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS	44
5.1. INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE FABRICAÇÃO	45
5.1.1. Tempo de Queima.....	45
5.1.2. Temperatura de Queima.....	48
5.1.3. Umidade de Extrusão.....	52
5.1.4. Quantidade de Blocos no Forno.....	55

5.1.5.	Relações entre Absorção de Água, Massa Específica Aparente e Resistência à Compressão.....	59
5.2.	INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DOS BLOCOS	61
5.2.1.	Resistência à Compressão das Unidades	61
5.2.2.	Resistência à Compressão dos Prismas	63
5.2.3.	Resistência à Compressão de Paredinhas	65
5.2.4.	Influência do fator de escala reduzido: comparação com trabalhos publicados	68
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	73
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
	ANEXOS	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Forma e dimensões (mm) dos blocos em escala reduzida	20
Figura 3.2 – Detalhe dos componentes da boquilha	22
Figura 3.3 – Patamares de umidade de extrusão obtidos	24
Figura 3.4 – Laminador de laboratório	25
Figura 3.5 – Correção da umidade e homogeneização manual da argila.....	26
Figura 3.6 – Extrusora de laboratório	27
Figura 3.7 – Corte dos blocos após extrusão	28
Figura 3.8 – Processo de queima, forno elétrico tipo mufla	30
Figura 4.1 – Forma e dimensões (mm) dos blocos inteiros, em escala reduzida.....	35
Figura 4.2 – Forma e dimensões (mm) dos meio-blocos, em escala reduzida.....	36
Figura 4.3 – Prismas de 3 blocos	40
Figura 4.4 – Aparato para a moldagem das paredinhas	42
Figura 4.5 – Esquema de monitoramento de deformações das paredinhas.....	43
Figura 5.1 – Influência do tempo de queima na perda ao fogo.....	46
Figura 5.2 – Influência do tempo de queima na absorção de água	47
Figura 5.3 – Influência do tempo de queima na área líquida.....	47
Figura 5.4 – Influência do tempo de queima na massa específica aparente.....	48
Figura 5.5 – Influência da temperatura de queima na perda ao fogo	49
Figura 5.6 – Influência da temperatura de queima na retração de queima.....	50
Figura 5.7 – Influência da temperatura de queima na massa específica aparente.....	50
Figura 5.8 – Influência da temperatura de queima na absorção de água	51
Figura 5.9 – Influência da temperatura de queima na área líquida	51
Figura 5.10 – Influência da temperatura de queima na resistência à compressão	52
Figura 5.11 – Influência da umidade de extrusão na retração de secagem	53
Figura 5.12 – Influência da umidade de extrusão na área líquida.....	54
Figura 5.13 – Influência da umidade de extrusão na absorção de água.....	54
Figura 5.14 – Influência da umidade de extrusão na massa específica aparente	55
Figura 5.15 – Influência da umidade de extrusão na resistência à compressão	55
Figura 5.16 – Influência do número de blocos no forno na retração de queima.....	57
Figura 5.17 – Influência do número de blocos no forno na massa específica aparente	57
Figura 5.18 – Influência do número de blocos no forno na resistência à compressão.....	58

Figura 5.19 – Influência do número de blocos no forno na absorção de água.....	59
Figura 5.20 – Influência do número de blocos no forno na área líquida.....	59
Figura 5.21 – Relação entre absorção de água e massa específica aparente.....	60
Figura 5.22 – Relação entre absorção de água e resistência à compressão.....	60
Figura 5.23 – Relação entre massa específica aparente e resistência à compressão	60
Figura 5.24 – Blocos cerâmicos utilizados por GOMES (1986)	70
Figura A. 1 – Gráfico tensão x deformação nas bases de medida das paredinhas de geometria A	94
Figura A. 2 – Gráfico tensão x deformação nas bases de medida das paredinhas de geometria B.....	94
Figura A. 3 – Gráfico tensão x deformação nas bases de medida das paredinhas de geometria C.....	95
Figura A. 4 – Gráfico tensão x deformação nas bases de medida das paredinhas de geometria D	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Composição química da argila	18
Tabela 3.2 – Análise granulométrica da argila, ensaio de peneiramento	19
Tabela 3.3 – Análise granulométrica da argila, ensaio de sedimentação	19
Tabela 4.1 – Cronograma de fabricação dos blocos	37
Tabela 4.2 – Traços de argamassa para alvenaria (BS 5628)	38
Tabela 4.3 – Granulometria da areia	39
Tabela 4.4 – Massa unitária dos materiais, em g/cm ³	39
Tabela 4.5 – Características da argamassa	39
Tabela 5.1 – Características dos blocos para diferentes tempos de queima	45
Tabela 5.2 – Características dos blocos para diferentes temperaturas de queima	49
Tabela 5.3 – Características dos blocos para diferentes umidade de extrusão	53
Tabela 5.4 – Características dos blocos para diferentes quantidades de blocos no forno	56
Tabela 5.5 – Características dos blocos com diferentes geometrias	61
Tabela 5.6 – Análise de variância da resistência à compressão dos blocos	62
Tabela 5.7 – Características dos blocos utilizados na moldagem dos prismas	63
Tabela 5.8 – Resistência à compressão média dos prismas, em MPa	64
Tabela 5.9 – Análise de variância da resistência à compressão dos prismas	64
Tabela 5.10 – Características dos blocos utilizados na moldagem das paredinhas	66
Tabela 5.11 – Resistência à compressão média das paredinhas	66
Tabela 5.12 – Módulos de elasticidade das paredinhas	66
Tabela 5.13 – Análise de variância da resistência à compressão das paredinhas	67
Tabela 5.14 – Resistências médias obtidas por GOMES (1986)	69
Tabela 5.15 – Resistência à compressão média das argamassas utilizadas por MENDES (1998)	71
Tabela 5.16 – Comparação com os resultados obtidos por MENDES (1998)	71
Tabela 5.17 – Resultados obtidos com as paredinhas de blocos de geometria A	71
Tabela A. 1 – Características físicas e mecânicas dos blocos – resultados médios para diferentes tempos de queima	84
Tabela A. 2 – Características físicas e mecânicas dos blocos – resultados médios para diferentes temperaturas de queima	85

Tabela A. 3 – Características físicas e mecânicas dos blocos – resultados médios para diferentes patamares de umidade da argila	86
Tabela A. 4 – Características físicas e mecânicas dos blocos – resultados médios para diferentes quantidades de blocos no forno.....	87
Tabela A. 5 – Características físicas e mecânicas dos blocos utilizados nos ensaios de compressão de unidades – resultados médios	88
Tabela A. 6 – Características físicas e mecânicas dos blocos utilizados na moldagem dos prismas – resultados médios	89
Tabela A. 7 – Características físicas e mecânicas dos blocos de geometria A e MA utilizados na moldagem das paredinhas – resultados médios	90
Tabela A. 8 – Características físicas e mecânicas dos blocos de geometria B e MB utilizados na moldagem das paredinhas – resultados médios	91
Tabela A. 9 – Características físicas e mecânicas dos blocos de geometria C e MC utilizados na moldagem das paredinhas – resultados médios	92
Tabela A. 10 – Características físicas e mecânicas dos blocos de geometria D e MD utilizados na moldagem das paredinhas – resultados médios	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
BS	British Standard
CH	Cal Hidratada
CIENTEC	Fundação de Ciência e Tecnologia
CP	Cimento Portland
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
SECTME	Secretaria de Estado da Ciência e Tecnologia, das Minas e Energia
NBR	Norma Brasileira
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

LISTA DE SÍMBOLOS

A	altura do corpo de prova
A_A	quantidade de água à ser adicionada na argila
A_{LQ}	área líquida
AA	absorção de água
C	comprimento do corpo de prova
cm	centímetro
cm^2	centímetro quadrado
cm^3	centímetro cúbico
CV	coeficiente de variação
E_{PA}	módulo de elasticidade das paredinhas
F	carga máxima de compressão
f_{CA}	resistência média à compressão da argamassa
f_{CB}	resistência média à compressão dos blocos cerâmicos
f_{CP}	resistência média à compressão dos prismas
f_{CPA}	resistência média à compressão das paredes
g	grama
kg	kilograma
kgf	kilograma força
kN	kilo newton
L	largura do corpo de prova
L_E	medida do corpo de prova úmido após extrusão
LL	limite de liquidez da argila
LP	limite de plasticidade da argila
L_Q	medida do corpo de prova após queima
L_S	medida do corpo de prova após secagem
m	metro
m^2	metro quadrado
m^3	metro cúbico

M_E	massa do corpo de prova úmido após extrusão
ME_A	massa específica aparente
M_i	massa do corpo de prova saturado e imerso em água
mm	milímetro
MPa	mega Pascal
M_Q	massa do corpo de prova após queima
M_{SAT}	massa do corpo de prova saturado
M_{SS}	massa do corpo de prova após secagem
M_U	massa total úmida da argila
N	Newton
PF	perda ao fogo
pol.	polegada
RC_B	resistência à compressão na área bruta
RC_L	resistência à compressão na área líquida
R_Q	retração linear de queima
R_S	retração linear de secagem
U_{EA}	umidade de extrusão da argila
U_M	massa úmida da amostra de argila
U_0	umidade inicial da argila
U_S	massa seca da amostra de argila
°C	graus celsius

RESUMO

O trabalho tem como objetivo principal desenvolver procedimentos de fabricação de blocos cerâmicos estruturais em laboratório e avaliar o comportamento de modelos de blocos cerâmicos em escala reduzida submetidos à ensaios de compressão axial.

Foi avaliada a influência de diversas variáveis de fabricação nas características físicas e mecânicas das unidades, as quais foram: tempo de queima, temperatura de queima, umidade de extrusão da argila e quantidade de blocos no forno durante o processo de queima. Os blocos foram submetidos aos ensaios de retração linear de secagem, perda ao fogo, retração linear de queima, absorção de água, área líquida, massa específica aparente e resistência à compressão.

Para viabilizar a fabricação de blocos cerâmicos em laboratório, foi utilizado um fator de escala 1:3.

Um estudo de caso foi realizado para avaliar a influência do fator de escala reduzida no comportamento de componentes de alvenaria de blocos cerâmicos. Foram desenvolvidas quatro diferentes geometrias de blocos, e realizados ensaios de resistência à compressão de unidades, argamassas, prismas e paredinhas. Analisou-se a influência da geometria dos blocos na resistência à compressão de elementos de alvenaria.

A umidade da argila influi em todos os ensaios de caracterização de blocos cerâmicos. A temperatura de queima, o tempo de queima e a quantidade de blocos no forno também apresentaram influência nas diferentes propriedades físicas e mecânicas das unidades.

Não houve diferença nos resultados de resistência à compressão na área líquida entre blocos com furos retangulares e blocos com furos arredondados.

A utilização de modelos em escala reduzida é confiável para avaliar o comportamento de elementos de alvenaria.

ABSTRACT

The aim of this work was to develop procedures for production of structural ceramic blocks in laboratory and to evaluate the use of small-scale modeling technique to study the structural behavior of ceramic block masonry structures submitted to the axial compression tests.

The influence of several manufacture variables in the physical and mechanical characteristics of the units was evaluated. The variables studied were: burning time, temperature of burning, clay drawing moisture and amount of blocks in the oven during the burning process. The blocks had been submitted to tests of drying linear retraction, firing loss, burning linear retraction, water absorption, net area, apparent specific mass and compressive strength.

A one-third-scale factor was used.

A case study it was carried out to evaluate the influence of the small-scale testing on the behavior of ceramic blocks masonry components. Four different geometries of blocks were produced and compressive strength tests were carried out with block units, mortars, prisms and small-walls. The influence of the geometry of the blocks in the compressive strength of masonry elements was analyzed.

The results showed that clay moisture influenced in all tests of blocks characterization. The temperature of burning, the burning time and the amount of blocks in the oven had also presented influence on the units physical and mechanical properties.

There was no difference in the compressive strength of block units on the net area among blocks with rectangular and circular holes.

The use of small-scale models is reliable to evaluate the behavior of masonry elements.

1. INTRODUÇÃO

A técnica da alvenaria estrutural é utilizada na construção há muitos séculos. No entanto, as construções eram realizadas de forma empírica, pois não havia um método racional de dimensionamento que possibilitasse o real aproveitamento das vantagens do método construtivo, o que implicava em construções dispendiosas, com paredes muito espessas. Com o surgimento de novas técnicas e novos materiais de construção, a alvenaria foi perdendo espaço como elemento estrutural.

À partir do século 20 a alvenaria tem sido utilizada com base em procedimentos racionais de dimensionamento. Isto implicou em estruturas com paredes mais esbeltas, reduzindo o custo, e atraindo o interesse dos construtores.

No processo da alvenaria estrutural, as paredes constituem um sistema que atende simultaneamente as funções de estrutura e vedação, o que resulta em diversas vantagens do ponto de vista construtivo, tais como a redução do número de sub-construtores e de tipos de materiais na obra, a maior facilidade de supervisão da obra, simplicidade de elaboração dos projetos executivos, simplicidade da execução da obra e facilidade de se contratar mão de obra. O processo possui grande potencial de racionalização, com conseqüente redução de custos e prazos.

A utilização de blocos cerâmicos na alvenaria apresenta como uma das vantagens a disponibilidade de jazidas de argila de boa qualidade em praticamente todas as regiões do país.

ROMAN (1991-A) justifica a preferência do uso dos blocos cerâmicos nas construções através dos séculos, baseado em razões de ordem técnica e econômica. É um material que apresenta boas características físicas, isto é, bom isolamento térmico e acústico; melhor resistência ao fogo do que outros materiais de construção tais como concreto, aço e madeira; boa aderência às argamassas e colas, o que permite o uso de diferentes tipos de revestimentos. As pequenas dimensões do bloco proporcionam grande flexibilidade aos projetistas na criação de novas formas arquitetônicas. O tamanho e a forma do material cerâmico ocasionam facilidade de manuseio e armazenagem durante a construção sem necessidade de equipamentos especiais.

Um diagnóstico realizado pela SECTME (Secretaria de Estado da Ciência e Tecnologia das Minas e Energia) em 1990 revelou a existência de mais de 700 olarias em Santa Catarina, distribuídas em sua maioria na região Sul do estado, Vale do Rio Tijucas e Vale do Itajaí e Oeste do Estado. Devido às dificuldades econômicas observadas no país na década de 90, houve uma preocupação de alguns empresários do setor de cerâmica vermelha em produzir materiais alternativos aos blocos cerâmicos de vedação, buscando aumentar sua participação de vendas no mercado de materiais de construção. Em função disto há atualmente diversas olarias produzindo blocos cerâmicos para utilização em alvenaria estrutural. Estes blocos apresentam as mais variadas geometrias e características mecânicas. Há necessidade de um completo estudo para o desenvolvimento de blocos cerâmicos que atendam características técnicas e econômicas de forma que componham um sistema construtivo em alvenaria estrutural.

A indústria de cerâmica vermelha enfrenta hoje problemas de falta de qualidade de seus produtos, devido a forma artesanal e por critérios totalmente empíricos que são produzidos, conseqüência da falta de conhecimento técnico de quem os produz.

Há uma carência de informações sobre o comportamento da alvenaria de blocos cerâmicos, pois a maioria das pesquisas desenvolvidas são com blocos de concreto, e, conseqüentemente, muitos dos parâmetros técnicos estabelecidos para alvenaria de blocos de concreto são também utilizados para alvenaria de cerâmica. A norma brasileira para cálculo de alvenaria estrutural, NBR 10837, é específica para blocos de concreto.

A norma brasileira para especificação de blocos cerâmicos, NBR 8042, define as dimensões dos blocos e estabelece que os furos dos blocos estruturais devem ser perpendiculares à face de assentamento, mas não faz nenhuma referência em relação à geometria dos blocos. Em todo o Brasil, encontra-se uma grande diversidade de formas e geometrias de blocos estruturais, pois cada empresa adota uma geometria própria.

Pelas razões acima, percebe-se a necessidade da realização de pesquisas para desenvolvimento de blocos cerâmicos para alvenaria estrutural.

Por outro lado, ensaios em escala natural são dispendiosos e difíceis de serem realizados no tempo e intensidade necessários.

Assim, o método de modelagem de estruturas em escala reduzida aparece com uma alternativa para o desenvolvimento de pesquisas com alvenaria estrutural em cerâmica. Este método vem sendo utilizado desde meados dos anos 50, e tem se mostrado uma técnica poderosa em substituição aos dispendiosos testes em escala real.

Para o desenvolvimento de estudos de novos produtos cerâmicos, a produção em escala industrial teria um custo muito elevado, já que seria necessário parar a linha de produção para fabricar fornadas inteiras de blocos. Por outro lado, o custo para se reproduzir uma linha de produção em escala real em laboratório também é muito alto. Com a utilização de equipamentos de pequeno porte, é possível produzir blocos em escala reduzida em laboratório, permitindo realizar estudos com diferentes geometrias sob diferentes condições de fabricação.

A modelagem em escala reduzida tem sido utilizada com sucesso em estudos de paredes, prismas e até mesmo em edifícios (SINHA et al, 1970), pois permite realizar testes em pequenos espaços físicos e sem a necessidade de grandes estruturas para os sistemas de aplicação de carga, reproduzindo com precisão o comportamento de protótipos em escala real. Os resultados de testes de estruturas em escala reduzida apresentam uma boa concordância com os resultados dos testes em escala natural, para os limites práticos de projeto, tanto em termos de deslocamentos e deformações quanto em relação aos modos de ruptura (SINHA et al, 1970).

A escolha do fator de escala geométrico para um determinado tipo de modelo depende de diversos fatores, incluindo os sistemas de carregamento disponíveis, facilidade de fabricação e tamanho adequado, de forma a assegurar uma boa mão de obra. Os fatores de escala mais usados nos modelos de elementos e componentes de alvenaria são $1/3$, $1/4$ e $1/6$.

Tendo em vista o exposto acima, decidiu-se desenvolver os procedimentos para a fabricação de materiais no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFSC, em escala reduzida, para utilização em pesquisas para o setor de cerâmica estrutural.

1.1. OBJETIVO PRINCIPAL

O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver procedimentos de fabricação de blocos cerâmicos estruturais em laboratório, estudando a influência de diversas variáveis de fabricação nas características físicas e mecânicas dos mesmos, assim como avaliar o comportamento em testes de modelos de elementos de alvenaria em escala reduzida.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos foram os seguintes:

- Desenvolver os procedimentos para as diversas etapas de fabricação dos blocos cerâmicos: preparação da argila, moldagem por extrusão, secagem e queima;
- Estudar a influência do tempo de queima, temperatura de queima, umidade de extrusão da argila e da quantidade de blocos no forno nas características físicas e mecânicas dos blocos;
- Estudar a influência da geometria das unidades na resistência à compressão de prismas e paredinhas;
- Avaliar a sensibilidade do fator de escala reduzido nos resultados dos ensaios de compressão dos blocos, prismas e paredinhas.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está composto em sete capítulos. Neste capítulo introdutório são apresentados alguns comentários à respeito dos temas abordados, os objetivos e a estruturação do trabalho.

No Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica sobre a situação do setor de cerâmica vermelha; do processo de fabricação de blocos cerâmicos e das pesquisas realizadas com modelos de elementos de alvenaria em escala reduzida.

A caracterização da argila utilizada e a descrição dos procedimentos adotados para a fabricação dos blocos cerâmicos em laboratório são apresentadas no Capítulo 3. São descritos ainda os ensaios de caracterização física e mecânica dos blocos fabricados.

O Capítulo 4 descreve as diversas geometrias utilizadas para o estudo do comportamento sob carga de compressão de blocos, prismas e paredinhas moldados em escala reduzida, assim como os procedimentos utilizados para a moldagem dos prismas e paredinhas, produção da argamassa e métodos de ensaio utilizados.

No Capítulo 5 são apresentados e analisados os resultados dos ensaios de caracterização física e mecânica dos blocos produzidos sob a influência de diversas

variáveis de fabricação e os resultados dos ensaios de compressão dos blocos, prismas e paredinhas de diferentes geometrias.

As conclusões e recomendações são descritas no Capítulo 6 e, finalmente, apresenta-se as referências bibliográficas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. O SETOR DE CERÂMICA VERMELHA NO BRASIL

No Brasil, verifica-se a existência de um grande número de empresas produtoras de tijolos e telhas cerâmicas, sendo estes os materiais mais utilizados na construção civil. A indústria cerâmica é um importante setor do ponto de vista sócio-econômico. Ao mesmo tempo, observa-se a má qualidade destes materiais e a escassez de pesquisas para o aperfeiçoamento dos processos produtivos e de utilização destes materiais. Comparando o setor da cerâmica vermelha com o setor da cerâmica de revestimento, há uma enorme diferença na estrutura organizacional das empresas, na modernização do processo produtivo e nos investimentos em pesquisa e desenvolvimento.

Em países como a Inglaterra, Canadá, Austrália e outros, o desenvolvimento dos produtos cerâmicos atingiu elevado nível de qualidade que possibilitou a evolução da técnica construtiva em alvenaria estrutural na década de 50, quando foi construído na Suíça um edifício de 13 pavimentos em 1953, e outro de 18 pavimentos em 1957.

Pesquisas realizadas anteriormente mostram que há uma desestruturação do setor da cerâmica vermelha no Brasil. De acordo com VILLAR (1988) raros são os empresários que fazem apropriação de custos ou que planejam a manutenção de equipamentos. As empresas têm estrutura familiar, os processos e equipamentos de fabricação são obsoletos, o controle de qualidade inexistente, a mão de obra utilizada é despreparada e não há qualquer preocupação em atender as especificações das normas brasileiras de blocos e telhas cerâmicas.

Um diagnóstico do setor de cerâmica vermelha em Santa Catarina, realizado pela Secretaria de Estado da Ciência e Tecnologia das Minas e Energia (SECTME) e publicado em Julho de 1990, permite a identificação de vários problemas. Dentre eles destacam-se:

- Desconhecimento das técnicas corretas de produção de material cerâmico;
- Uso de madeira como combustível, ocasionando problemas ambientais;
- Desconhecimento de normas técnicas sobre a qualidade do produto cerâmico;

- Concorrência predatória baseada na diminuição das dimensões dos tijolos e blocos como forma de diminuição de custo;
- Dificuldade de obtenção de assistência técnica qualificada;
- Irregularidade na atividade extrativa da lenha e argila usadas para a produção do material;
- Dificuldade de gerenciamento da produção;
- Desperdício de matéria-prima pela exploração não planejada de argilas;
- Desperdício de energia;
- Inexistência de controle de qualidade.

OLIVEIRA (1993) coletou mais de 1000 blocos cerâmicos em 28 olarias de Santa Catarina, realizou ensaios dimensionais e de resistência à compressão, e não encontrou nenhuma amostra que estivesse inteiramente de acordo com as especificações das normas técnicas da ABNT.

Os fatores acima descritos, aliados às condições de operação da indústria da construção, que trabalha com níveis de desperdício muito altos, até à bem pouco tempo repassados ao usuário no preço de venda, fizeram com que este setor industrial não tivesse o desenvolvimento correspondente à sua importância na economia.

2.2. PROCESSO DE FABRICAÇÃO

O processo mecanizado de fabricação de produtos de cerâmica vermelha compreende 5 operações fundamentais: extração e estocagem de matéria prima, preparação da massa cerâmica, moldagem das peças, secagem das peças moldadas e, queima ou cozimento das peças moldadas.

2.2.1. Extração e Estocagem de Matéria Prima

A argila é a principal matéria prima utilizada na fabricação de tijolos e blocos cerâmicos. É essencialmente constituída de silicatos de alumínio hidratado, contendo traços de minérios secundários.

Segundo DURÃES (1985-A), as argilas, quando contêm certa percentagem de calcário, são denominadas tecnicamente de margas, não devendo ser confundidas com argilas magras, em termos de cerâmica vermelha. As argilas magras contêm certa percentagem de sílica ou silicatos e são misturadas às argilas puras, também chamadas argilas fortes ou gordas, quando na fabricação de produtos cerâmicos, afim de reduzir a plasticidade excessiva destas. A percentagem de mistura dessas duas matérias primas principais é determinada, nas pequenas e médias indústrias, pelos conhecimentos práticos dos preparadores de argila.

Uma das principais características das argilas utilizadas na fabricação de blocos cerâmicos é a plasticidade. As argilas plásticas são aquelas que, adicionadas de água, passam ao estado plástico e são facilmente moldáveis por compressão ou extrusão, conservando a forma até a secagem.

Segundo SANTOS (1989), as características essenciais das argilas para serem usadas na fabricação de produtos de cerâmica vermelha são: ser facilmente moldáveis, ter valor médio ou elevado para a tensão de ruptura à flexão, antes e após a queima, e apresentar um mínimo de trincas e empenamentos após a queima. Estas características são determinadas pela plasticidade, pela capacidade de absorção e cessão de água, e pelo seu comportamento ao calor: alteração de volume durante a secagem e a queima.

As argilas são geralmente extraídas a céu aberto, através de processos manuais ou mecanizados, dependendo do tipo de argila, quantidade a ser extraída diariamente, da topografia do terreno e da disponibilidade de mão de obra.

As argilas extraídas em um mesmo local nem sempre se prestam à produção dos blocos ou tijolos. Ou são muito fracas ou muito fortes, e, por essa razão estão quase sempre sujeitas a uma mistura com outro tipo de argila para compensar suas deficiências.

Após a extração, a argila é depositada em pilhas próximo à indústria onde é submetida à ação dos agentes atmosféricos. Este processo de tratamento da argila é chamado meteorização, e tem como objetivo melhorar a qualidade das mesmas.

A argila deve ser disposta preferencialmente em camadas, e a posterior coleta deve abrangê-las todas. Desta forma obtém-se a homogeneização das diversas variações na composição da argila que podem ocorrer durante a exploração de uma jazida.

Para melhorar ainda mais a qualidade da argila utilizada na fabricação de produtos mais delicados, esta pode ser submetida aos processos de amadurecimento, apodrecimento e levigação.

2.2.2. Preparação da Massa Cerâmica

A primeira etapa do processo de preparação é a dosagem dos diferentes tipos de argila que são utilizados. Esta dosagem normalmente é realizada por volume, através das caçambas dos tratores que alimentam o dosador-alimentador. Este tem por finalidade realizar a primeira mistura mecanizada das matérias primas e alimentar uniformemente todo o conjunto de máquinas. A parte superior do dosador-alimentador fica ao nível do solo e no fundo há uma esteira transportadora que conduz a argila ao destorroador.

O destorroador, ou desintegrador, é constituído de anéis dentados que cortam e trituram os torrões de argila. Um dispositivo especial com dois cilindros, um liso e outro estriado, em forma de rosca sem-fim, elimina as pedras que acompanham a argila.

Do destorroador, a argila é transportada ao misturador horizontal que tem por finalidade completar a mistura da argila. Nesta etapa do processo é adicionada a água necessária à sua plastificação.

Após o misturador, a argila é transportada ao laminador, no qual a argila pastosa é reduzida à lâminas finas, fazendo-a passar entre dois cilindros de aço que giram a velocidades diferentes, de modo que, além de triturar por esmagamento, produza mais uma mistura. Algumas instalações utilizam laminadores duplos, com dois pares de cilindros, para obter um produto de melhor qualidade.

2.2.3. Moldagem por Extrusão

A moldagem dos blocos é feita por uma extrusora, mais conhecida por maromba. Quando a argila é introduzida na extrusora, esta é impelida para a frente através de um parafuso sem-fim, passa pela câmara de vácuo e, depois, através dos orifícios da boquilha, que é o molde dos blocos. O bloco de argila que sai através da boquilha corre sobre rolos da máquina cortadora e é automaticamente cortado em tamanhos pré-fixados e que correspondem ao comprimento ou altura do tijolo ou blocos cerâmicos.

A função da câmara de vácuo é reduzir ao mínimo o ar contido ou incluído na massa cerâmica pela ação das misturas e água agregada. Conseqüentemente, os

produtos moldados em extrusoras à vácuo geralmente apresentam qualidade superior aos moldados em extrusoras comuns.

2.2.4. Secagem

A operação de secagem tem a função de eliminar a água agregada, ou de amassamento, que resta na massa após a extrusão, deixando apenas uma pequena porcentagem necessária para manter a resistência do produto para o manuseio. Deve ser lenta e uniforme, a fim de que a água seja eliminada igualmente e gradativamente de toda a massa.

A secagem pode ser processada de duas formas: secagem natural e secagem artificial. A secagem natural se processa pela evaporação natural da água, ao ar livre, e a porcentagem final de água residual depende da umidade relativa do ar. É um método ainda bastante utilizado em muitas pequenas olarias, porém não muito adequado. É um método lento, não há controle da umidade residual, necessita de grandes áreas de secagem e está sujeito às variações climáticas.

A secagem artificial em estufas aquecidas artificialmente proporciona melhor controle do processo de secagem, independência racional do sistema, possibilidade de melhor programação da produção e redução das perdas.

O aquecimento das estufas ou secadeiras é obtido pelo ar quente recuperado dos fornos ou pelo ar quente gerado por uma fornalha.

2.2.5. Queima

O objetivo da queima dos produtos cerâmicos é o de provocar, através da temperatura em que a queima é efetuada nos fornos, certas transformações químicas e físicas dos materiais que compõem a massa cerâmica.

A temperatura de queima é evidentemente primordial, porém as transformações entre os constituintes são relativamente lentas, e, portanto, o tempo de queima tem uma influência marcante quando a temperatura é bastante elevada para provocar as reações químicas.

Segundo PRACIDELLI (1981), durante a queima de um corpo cerâmico, à medida que a temperatura aumenta, ocorrem os seguintes fenômenos:

- a) Um pouco acima de 100 °C ocorre a eliminação de água higroscópica;
- b) Em torno de 200 °C dá-se a eliminação da água “coloidal” das partículas de argila;
- c) Entre 350 °C e 600 °C, ocorre a combustão das substâncias orgânicas, com eliminação de gás carbônico, que podem estar contidos nas argilas e começa a dissociação dos sulfetos e dos sulfatos com a liberação do gás sulfuroso;
- d) Entre 450 °C e 650 °C, ocorre a decomposição da substância argilosa, com liberação da água de constituição, sob forma de vapor de água, a qual está ligada quimicamente à sílica e à alumina;
- e) Entre 800 °C e 950 °C, verifica-se a decomposição dos carbonatos, com liberação de gás carbônico;
- f) À partir de 900 °C, verifica-se a reação química da sílica e alumina com elementos fusíveis, reação que dá lugar à formação de sílico aluminatos complexos que proporcionam ao corpo cerâmico as características de dureza, estabilidade, resistência à vários agentes físicos e químicos e também a coloração pretendida.
- g) Acima de 1000 °C, a temperatura máxima para a queima varia conforme a composição química e mineralógica da massa, proporcionando a dureza, a compactação e a impermeabilidade desejada.

Os tipos de fornos utilizados na fabricação de produtos de cerâmica vermelha são: fornos intermitentes, semi-contínuos e contínuos.

Nos fornos intermitentes, o material é carregado no interior do forno, aquecido, a carga é queimada e resfriada. Após, o material é retirado e substituído por nova carga. Existem diversos modelos, alguns de forma circular e outros retangulares. É um modelo antigo aquecido à lenha, atualmente alguns são aquecidos à óleo. Quando a cerâmica possui mais de um desses fornos, eles podem ser ligados entre si, e os gases de escapamento de um forno aceso pode ser utilizado para pré-aquecer outro, tornando o processo semi-contínuo e reduzindo o tempo e o custo da operação. Sua eficiência de produção é muito baixa, pois o tempo de aquecimento e resfriamento é muito demorado, com consumo energético muito alto. Além disso, como o material é acondicionado em pilhas, há muita variabilidade entre os blocos acondicionados mais externos à pilha em relação aos mais internos.

Dos fornos de compartimentos contíguos, chamados de semi-contínuos, o mais conhecido e utilizado na indústria de cerâmica vermelha é o forno Hoffmann. É mais eficiente e econômico que os fornos intermitentes, porém tem um alto custo de construção. Este forno é dividido em câmaras interligadas por um coletor de gás central. As câmaras são aquecidas sequencialmente e enquanto a queima prossegue em determinadas câmaras, as anteriores vão esfriando, até que possam ser descarregadas e recarregadas, e as posteriores vão sendo pré aquecidas.

O forno contínuo é aquele em que a queima se faz continuamente sem interrupção para descarga ou carga do material. Nos fornos do tipo túnel, o material entra seco por uma extremidade e, transportado por esteiras ou carrinhos, sai pela outra extremidade já queimado. Ao longo do forno, o material passa pelas etapas de aquecimento, queima e resfriamento.

Os fornos contínuos são os mais econômicos e eficientes, e são muito utilizados na cerâmica branca, porém, atualmente algumas indústrias de cerâmica vermelha já estão utilizando este tipo de forno.

2.2.6. Defeitos de Fabricação

A grande maioria dos defeitos que ocorrem nos produtos cerâmicos é proveniente da falta de homogeneização das massas, pois as matérias primas variam muito na sua composição e contêm impurezas que lhes dão as mais variadas características de qualidade. Portanto, deve haver muito cuidado nas etapas de dosagem, mistura, moagem e homogeneização da água de amassamento. Muitas vezes, porém, os defeitos são provenientes da má regulação das máquinas ou do uso de procedimentos não adequados ao longo do processo produtivo.

➤ O denteado, também conhecido por “dente de cachorro”, localiza-se nas arestas dos blocos e ocorre durante o processo de extrusão. Pode ser ocasionado por um avanço desigual da massa na saída da boquilha ou de uma lubrificação desigual da mesma. As boquilhas devem ser projetadas e posicionadas de forma que ofereçam o mínimo de resistência à passagem da argila, de maneira uniforme e bem centralizadas na cabeça da extrusora. As arestas dos moldes devem ser lisos e lubrificados e a câmara interna da boquilha deve estar livre de pedaços de argila seca ou raízes. O denteado também pode ser provocado por baixa coesão da massa, consequência de uma má homogeneização ou

conteúdo inadequado de água na massa plástica. A eliminação do ar ocluso na massa, por meio de vácuo, também pode eliminar o defeito.

➤ A laminação, que se caracteriza pela orientação textural das partículas de argila, tipo placa (lâmina ou lamelar) na massa de extrusão, é um defeito muito comum na fabricação de produtos de cerâmica vermelha. De uma forma geral, pode-se dizer que é provocada pela falta de coesão da massa, má homogeneização e umidade inadequada. Diversos autores afirmam que argilas gordas, mais plásticas, tendem à laminar mais. Os fabricantes de blocos cerâmicos geralmente ajustam as boquilhas e acrescentam um pouco de areia para reduzir as laminações.

➤ As trincas de secagem se produzem quando as peças perdem, por unidade de tempo, uma quantidade de água muito elevada, ou ainda, por uma secagem não uniforme da massa. Inicialmente a secagem deve ser lenta e uniforme, a fim de que a água seja eliminada igualmente de toda a massa. Após ultrapassar o período no qual a retração linear é constante, pode-se acelerar o processo de secagem, diminuindo o tempo e aumentando a temperatura. A coesão ou capacidade de aglutinação da argila é um fator decisivo para a susceptibilidade ante à secagem. Quando a umidade residual do processo de secagem for muito alta, podem ocorrer trincas durante o processo de queima, pois ali a água é eliminada muito rapidamente.

➤ Trincas de queima também ocorrem quando há o resfriamento rápido das peças na faixa de temperatura de 500 °C à 600 °C, quando ocorre a reversão do quartzo-beta em quartzo-alfa. Redução do teor de quartzo na massa e baixa velocidade de resfriamento, entre 10 °C/hora e 25 °C/hora, durante a faixa crítica eliminam o problema.

➤ O estourado, que se caracteriza pela fragmentação dos blocos durante a queima, é provocado pela presença de grânulos de calcário na argila. Durante a queima ocorrem reações químicas, gerando cal livre (CaO), que reage com a água produzindo Ca(OH)_2 , aumentando de volume e provocando o estouro. Grãos de quartzo, de gesso e de pirita também podem provocar este defeito. A separação do mineral de calcita, antes da preparação da massa, e a moagem fina e homogeneização da argila que contém o calcário evitam a ocorrência deste defeito.

2.3. PESQUISAS COM MODELOS EM ESCALA REDUZIDA

Os primeiros esforços em modelar em escala reduzida estruturas de alvenaria, encontrados na literatura internacional, foram realizados por VOGT (1956) nos meados dos anos 50. Primeiramente, foram utilizados blocos cerâmicos em escala 1/4 e posteriormente blocos em escala 1/10. Estes estudos tiveram caráter exploratório.

HENDRY E MURTHY (1965) realizaram nos anos 60 testes em escala 1/3 e 1/6 em paredes e pilares de blocos cerâmicos. Testes realizados em pilares de blocos cerâmicos em escala real pela Building Research Station foram reproduzidos em escala 1/3 e 1/6 para determinar se há influência do fator de escala. Um estudo realizado na Universidade de Liverpool com paredes em escala real também foram reproduzidos na escala 1/6. Concluíram que a resistência da alvenaria em escala real podem ser repetidos com razoável precisão por modelos em escala reduzida. Observaram, ainda, que se a mesma argamassa for utilizada para a construção dos elementos em escala real e dos modelos em escala reduzida, os modelos apresentam resistência superior aos equivalentes elementos em escala real. Para reproduzir os resultados em escala real, utilizaram corpos de prova cúbicos de 1 pol. para a argamassa em escala, os quais devem ter a mesma resistência dos corpos de prova de 2,78 pol. utilizados para a argamassa usada nos elementos em escala real.

SINHA et all (1970) investigaram a ação do cisalhamento em paredes sob carga lateral, utilizando escala real e 1/6 em um edifício de 5 pavimentos. Concluíram que, desprezando algumas diferenças na rigidez entre modelo e protótipo, em geral, o modelo de alvenaria comportou-se de modo similar à alvenaria em escala real e pode prever com precisão comportamento e resistência.

BAKER (1972) realizou testes em paredes de blocos cerâmicos carregados axial e lateralmente nas escalas 1/3 e 1/6.

FIORATO et all (1970) utilizou blocos cerâmicos em escala 1/4 para estudar a interação entre a alvenaria de tijolos e as estruturas de concreto.

Até o final nos anos 60 os estudos em modelos reduzidos com alvenarias de blocos de concreto haviam recebido pouca atenção, em relação aos blocos cerâmicos. Os primeiros estudos com modelos reduzidos de blocos de concreto foram realizados pelo NBS (National Bureau of Standards). Foram utilizados blocos de concreto em escala 1/4, porém os resultados dos estudos não foram conclusivos.

Nos anos 70, uma metodologia e técnicas de modelagem de alvenarias de blocos de concreto em escala 1/4 foram desenvolvidas por HARRIS E BECICA (1977) na Universidade de Drexel. Concluíram que a modelagem em escala 1/4 de alvenarias não grauteadas é possível de ser realizada. Um estudo posterior foi realizado por HAMID E ABBOUD (1986), utilizando os mesmos modelos de unidade, para avaliar o comportamento de alvenarias de blocos de concreto grauteadas e não grauteadas, e concluíram que os resultados com modelos reduzidos podem prever o comportamento global da alvenaria. Os autores observaram que havia alguns desvios dos resultados em relação à protótipos em escala real, e que os principais motivos foram as imperfeições das unidades em escala reduzida e má qualidade da mão de obra.

ABBOUD et all (1990) cita que para produzir elementos de alvenaria compostos por blocos (cerâmicos ou de concreto), argamassa, graute e armadura, o método de modelagem em escala reduzida deve satisfazer os requisitos de similaridade não apenas dos blocos, mas também das juntas de argamassa, graute e armadura. Para uma modelagem real, os requisitos de similaridade podem ser divididos em quatro grupos: carregamento, geometria, propriedades dos materiais e projeto.

Na Universidade de Drexel (ABBOUD et all, 1990) os fatores de escala três e quatro têm sido usados na modelagem de elementos de alvenaria de blocos de concreto. A escolha destes fatores é baseada no fato de que o Laboratório de Alvenaria da Universidade de Drexel possui uma máquina de fabricação de blocos com moldes para fabricar unidades em escala 1/4 ou 1/3 em relação aos protótipos, e, além disso, um estudo anterior indicou que fatores de escala menores que 1/4 poderiam causar dificuldades em modelar a espessura das juntas.

Estudos realizados na Universidade de Drexel (ABBOUD et all, 1990) com unidades de diferentes geometrias produzidas em escala 1/4, ensaiadas sob compressão axial, mostraram que o modo de ruptura e a deformação última dos blocos são semelhantes aos obtidos em pesquisas anteriores com unidades em escala real. Um modelo de argamassa possuindo as propriedades de uma argamassa tipo S da ASTM foi desenvolvida para modelar alvenarias, consistindo em material cimentante (cimento portland e cal) e areia, com água o suficiente para obter boa trabalhabilidade. Para satisfazer os requisitos de similaridade com as juntas de 10 mm normalmente utilizadas na prática, as partículas de areia maiores que 1,10 mm foram removidas.

FUSCO E CAMACHO (1994) realizaram ensaios com prismas em escala real, 1/3 e 1/5. Nos prismas em escala real, a areia utilizada na argamassa foi dividida em

duas partes iguais: retidas nas peneiras #50 (3,0 mm) e #100 (1,5 mm). Nas escalas 1/3 e 1/5 trabalharam com areia retida e passante na peneira #100 (1,5 mm), em partes iguais. A resistência à compressão aos 28 dias dos modelos foi 25% menor do que do protótipo.

Com base na revisão da literatura pode-se observar que:

1. O processo de fabricação de blocos cerâmicos requer uma série de etapas cujo conhecimento e controle de qualidade são fundamentais para a redução ou eliminação dos defeitos de fabricação;
2. A produção de blocos em escala reduzida tem sido empregada por diversas instituições e pesquisadores para avaliação do comportamento e resistência de estruturas em alvenaria;
3. Os modelos reduzidos de estruturas em alvenaria fornecem informações que permitem prever com boa margem de confiabilidade o comportamento de estruturas em escala natural.

3. PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE BLOCOS CERÂMICOS EM LABORATÓRIO

Neste capítulo são descritos os procedimentos utilizados em cada etapa do processo de fabricação dos blocos cerâmicos em laboratório, assim como a caracterização da argila utilizada. São descritos os ensaios de caracterização física e mecânica dos blocos produzidos.

O objetivo desta fase do trabalho foi avaliar os procedimentos e variáveis que influenciam na fabricação de blocos cerâmicos em laboratório. Todas as observações feitas durante o desenvolvimento do trabalho e sua influência no processo de fabricação são descritas, e os resultados dos estudos com algumas variáveis de fabricação são apresentados no final do capítulo.

As variáveis estudadas foram: tempo de queima, temperatura de queima, umidade de extrusão da argila e quantidade de blocos no forno durante a queima.

3.1. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL UTILIZADO

A argila utilizada no programa experimental foi coletada em uma indústria cerâmica de Santa Catarina.

A empresa utiliza dois tipos distintos de argila para a fabricação de blocos estruturais, as quais passam por um processo de mistura, moagem e homogeneização. As duas argilas, após dosadas e misturadas no alimentador, vão ao destorroador onde os torrões são desagregados e em seguida levadas ao misturador horizontal. Neste último se processa a mistura total das argilas e se adiciona água para ajustar a umidade ideal para a extrusão. Do misturador, a argila é transportada ao laminador, onde é moída em partículas de no máximo 4 mm de diâmetro. Após esta etapa de preparação, a argila está pronta para o processo de moldagem.

A argila foi coletada após o processo de moagem pelo laminador, pois desta forma se garantiu uma boa mistura e homogeneização do material, e, conseqüentemente,

melhor qualidade dos blocos fabricados em laboratório. O material foi acondicionado em sacos plásticos para manter a umidade. Foi coletado um total de 400 kg de argila.

3.1.1. Análise Química

A argila para cerâmica vermelha é um sedimento geológico resultante da decomposição de rochas silicosas e aluminosas, principalmente os feldspatos, geralmente pela ação atmosférica. É essencialmente um silicato de alumínio hidratado, contendo ferro, cálcio e magnésio. É uma rocha natural terrosa que adquire certa plasticidade quando misturada com água e suas partículas se encontram com dimensões abaixo de 0,005 mm.

A composição química da argila (Tabela 3.1) foi determinada através de análise química por fluorescência de Raios-X, e foi realizada no Centro de Tecnologia em Cerâmica de Criciúma.

Tabela 3.1 – Composição química da argila

Compostos	Percentual em massa
SiO ₂	61,46 %
Al ₂ O ₃	19,73 %
Fe ₂ O ₃	7,00 %
CaO	0,05 %
Na ₂ O	0,18 %
K ₂ O	2,13 %
MnO	0,08 %
TiO ₂	0,91 %
MgO	0,97 %
P ₂ O ₅	0,22 %
Perda ao fogo	7,27 %

3.1.2. Análise Granulométrica

A análise granulométrica da argila foi determinada conforme o método de ensaio NBR 7181 (ABNT, 1984). A Tabela 3.2 apresenta os resultados da análise

granulométrica por peneiramento e a Tabela 3.3 apresenta os resultados da análise granulométrica por sedimentação.

Tabela 3.2 – Análise granulométrica da argila, ensaio de peneiramento

Peneira		Porcentagem Passante
N.º	# (mm)	
10	2,0	100,00 %
16	1,2	99,82 %
30	0,6	98,76 %
40	0,42	97,37 %
70	0,25	94,56 %
100	0,15	92,46 %
200	0,075	86,64 %

Tabela 3.3 – Análise granulométrica da argila, ensaio de sedimentação

Diâmetro dos grãos (mm)	Percentual da amostra com diâmetro < D
D	P
0,0673	75,10 %
0,0479	72,91 %
0,0342	69,51 %
0,0233	67,62 %
0,0167	61,99 %
0,0123	59,80 %
0,0088	56,31 %
0,0063	51,56 %
0,0045	49,28 %
0,0032	46,13 %
0,0025	43,73 %
0,0014	37,65 %

3.1.3. Limites de Liquidez e Plasticidade da Argila

A plasticidade é a propriedade do corpo que submetido à força determinada, se deforma e conserva indefinidamente a deformação quando se anula a força. Semelhante à ductilidade e maleabilidade dos metais, quanto aos efeitos, diferenciando-se quanto à

intensidade de força produtora, o estado plástico é intermediário entre o sólido e líquido com propriedades dos dois.

Os limites de plasticidade e liquidez são indicações, respectivamente, dos limites entre os estados plástico/sólido e plástico/líquido e foram determinados através dos métodos de ensaio NBR 7180 (ABNT, 1984) e NBR 6459 (ABNT, 1984).

Quando a moldagem é por extrusão, a umidade da argila deve ser superior ao limite de plasticidade (LP) e inferior ao limite de liquidez (LL). Para a argila utilizada foi encontrado $LP = 28,70 \%$ e $LL = 61,29 \%$.

3.2. UNIDADES

A geometria dos blocos foi definida com base nos blocos estruturais comercialmente produzidos pela empresa na qual foi coletada a argila. Estes blocos possuem dimensões de 140x190x290 mm (largura x altura x comprimento), com duas cavidades e espessura de paredes de 25 mm.

O fator de escala adotado para a fabricação dos blocos em laboratório foi 1/3. A Figura 3.1 mostra a forma e as dimensões dos blocos em escala reduzida.

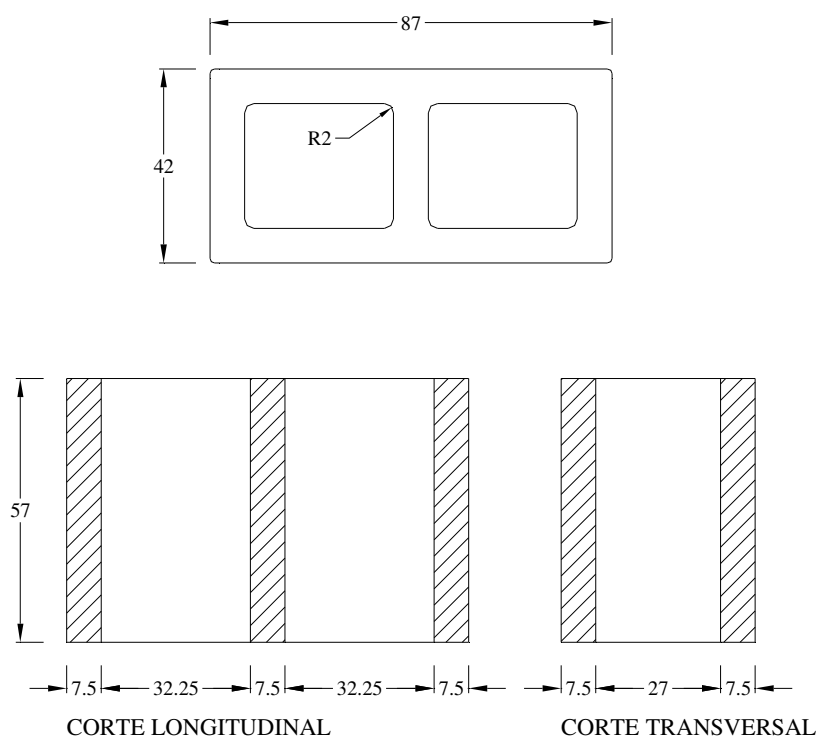


Figura 3.1 – Forma e dimensões (mm) dos blocos em escala reduzida

3.3. MOLDES

O molde ou “boquilha” tem a função de dar a forma aos blocos fabricados. Sua correta fabricação, regulagem e montagem tem grande importância na fabricação de blocos cerâmicos.

O primeiro passo para a construção da boquilha foi determinar as medidas de saída da mesma, levando-se em consideração a retração que os blocos sofrem durante os processos de secagem e queima até formar as dimensões finais desejadas. A determinação da retração linear de secagem e retração linear de queima foi baseada, respectivamente, nos métodos de ensaio C 021 e C 026 da Fundação de Ciência e Tecnologia (CIENTEC) de Porto Alegre. Foram moldadas barras de 100 mm de comprimento com seção transversal de 15 mm x 25 mm, utilizando um molde padrão que é fornecido pelo fabricante da extrusora. A retração total obtida foi de 7,5 %.

As boquilhas foram fabricadas pela empresa que forneceu a argila. A Figura 3.2 mostra os diversos componentes da boquilha.

A boquilha deve ser projetada e regulada de modo que a massa avance através da mesma de forma uniforme, caso contrário os blocos moldados sofrerão deformações durante os processos de secagem e queima. No cavalete, contido no interior da câmara de compressão, são fixados os suportes dos machos, que têm a função de formar os vazados do bloco. O cavalete, o suporte dos machos e a câmara de compressão devem ser ajustados para que ofereçam o mínimo de resistência à passagem da argila e de maneira uniforme, sem provocar diferentes pressões no interior da câmara de compressão. São utilizados freios na periferia da parte interna da boquilha, onde monta-se o cavalete, para regular a saída da massa. Assimetria dos componentes da boquilha também provoca desvios de passagem da massa.

A regulagem da boquilha baseia-se na observação da velocidade do fluxo da massa, ao longo de sua seção transversal. Para isto, corta-se a massa rente à saída da boquilha e depois a extrusora é ligada. Se a superfície cortada, a medida que a massa avança, tornar-se côncava, significa que há maior resistência à passagem pelo meio da boquilha, ou seja, há maior velocidade de fluxo nas laterais da boquilha. Caso a superfície torne-se convexa, há maior velocidade de fluxo pelo centro da boquilha.

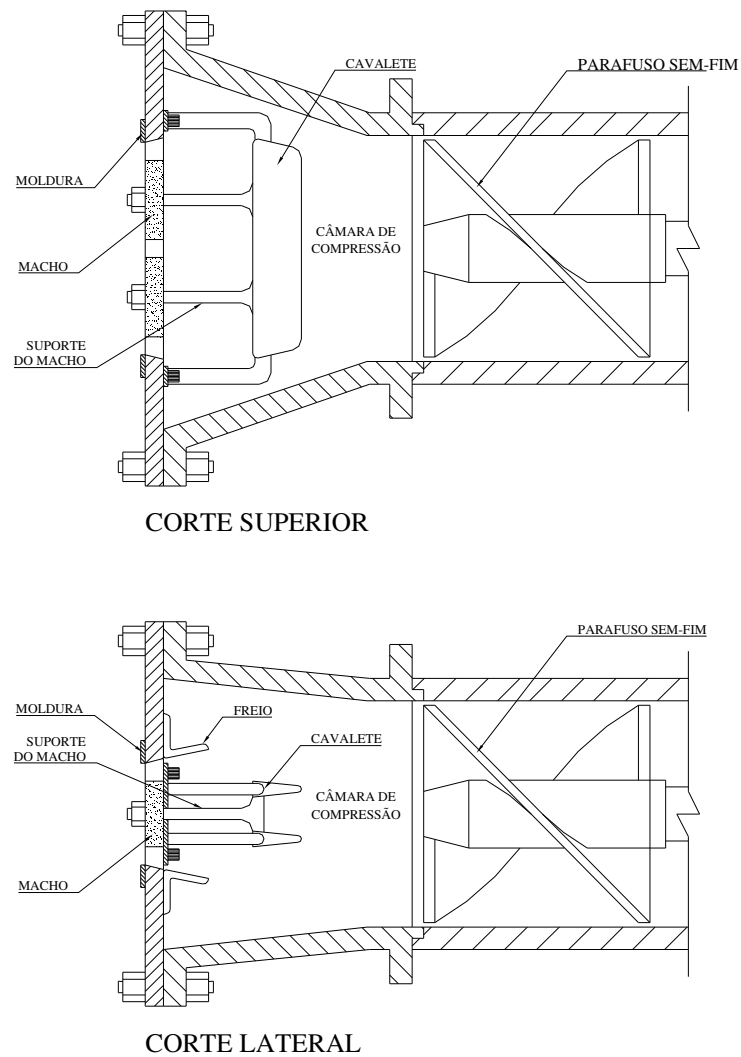


Figura 3.2 – Detalhe dos componentes da boquilha

Na boquilha utilizada, os ajustes foram feitos utilizando os freios para reduzir ou aumentar a resistência de passagem pelas laterais da boquilha e, reduzindo ou aumentando as dimensões das peças que compunham o cavalete para controlar a passagem da argila pelo centro. A regulagem foi feita de forma que a superfície de corte apresentasse leve concavidade. Observou-se que, quando a superfície de corte for plana ou levemente convexa, há a ocorrência de trincas nos blocos após o processo de secagem, o que compromete a resistência à compressão.

Durante a montagem da boquilha deve-se ter atenção para que esta esteja perfeitamente centrada em relação ao eixo do parafuso sem-fim da extrusora, caso contrário haverá desvios laterais da massa após a passagem pela boquilha.

3.4. PROCESSO DE FABRICAÇÃO DOS BLOCOS

As etapas do processo de fabricação dos blocos consistem em: moagem, correção da umidade da argila, homogeneização, moldagem dos blocos, secagem e queima.

A moldagem dos blocos foi realizada pelo processo de extrusão à vácuo de massa plástica.

Alguns teste preliminares de produção foram realizados para determinar o teor de umidade ótimo da argila para a extrusão, afim de se obter o grau de compactação e coesão máximo da massa formada. O limite de plasticidade encontrado para a argila foi de 28,7 %. A argila coletada e acondicionada em sacos plásticos apresentava umidade em torno de 30%.

Umidades excessivas da argila tendem a provocar denteados e laminação ao sair pela boquilha da extrusora, devido à baixa coesão da massa. Deve-se observar que a baixa coesão também pode ser causada pela insuficiente homogeneização. O processo de moagem pelo laminador reduz a massa de argila em lâminas, e a passagem desta através do parafuso sem-fim da extrusora, sob pressão, têm a finalidade de compactar a argila para formar uma massa coesa. Por consequência, diversas vezes é necessário passar a argila mais de uma vez pela extrusora. Quando a umidade da argila é muito alta, os blocos moldados, ainda úmidos, não apresentam uma consistência rija e são facilmente deformáveis sob pressão dos dedos.

Por outro lado, umidades muito baixas, próximas ao limite de plasticidade da argila, formam uma massa quebradiça e sem coesão.

A umidade de extrusão foi determinada por tentativa. A argila foi inicialmente umedecida até apresentar cerca de 35 % de umidade e então levada à extrusora. A massa que saía pelo bocal da extrusora foi cortada e levada de volta à extrusora. Esta operação foi repetida até se obter uma massa com consistência firme e textura lisa, sem apresentar laminação e denteados, sendo então determinada a umidade da massa. Assim, adotou-se uma umidade padrão de extrusão igual a 32 % .

Posteriormente, para estudar a influência da umidade de extrusão nas características físicas e mecânicas dos blocos, repetiu-se o processo descrito acima. A cada passagem da argila pela extrusora, há perda de umidade devido ao calor gerado pelo atrito das hélices e pela pressão exercida sobre a argila. Assim, a mesma argila foi

levada à extrusora 5 vezes, e esperava-se obter 5 níveis diferentes de umidade dos blocos moldados.

A cada passagem, 6 corpos de prova foram moldados. Após o processo de secagem, a umidade de extrusão dos corpos de prova foi determinada, e 5 patamares de umidade distintos foram obtidos, conforme pode ser observado na Figura 3.3. Os valores médios de cada patamar foram: 34,41 %; 32,84 %; 31,90 %; 31,47 % e 30,33 %.

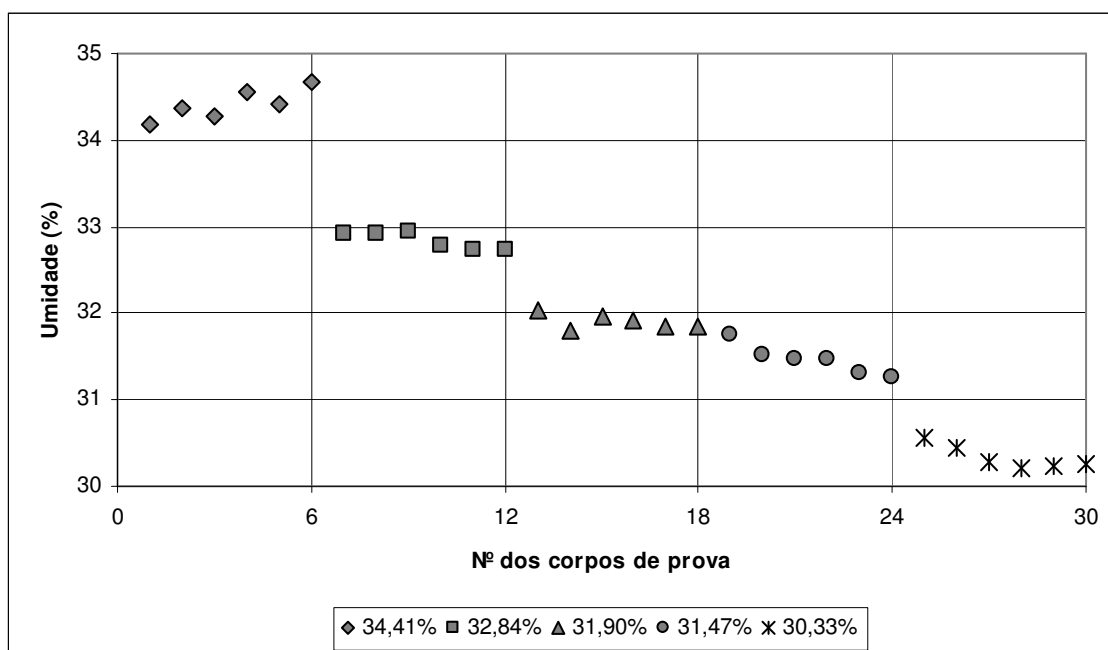


Figura 3.3 – Patamares de umidade de extrusão obtidos

3.4.1. Moagem, Correção da Umidade e Homogeneização

A quantidade de argila utilizada para cada fabricação de blocos variou de 20 à 25 kg, com a qual produz-se de 30 a 50 unidades, respectivamente.

A moagem da argila foi feita através de um laminador de laboratório e teve a finalidade de transformar a argila pastosa em lâminas finas, triturando os grãos de pedras e outras impurezas. O laminador consiste de dois rolos com 140 mm de diâmetro e 120 mm de largura, e espaçamento de 1,5 mm entre os rolos (Figura 3.4). Devido às diferentes velocidades de rotação dos rolos, consegue-se a desintegração da argila, pois além da laminação há o atrito de deslizamento, o que proporciona uma melhor mistura e maior homogeneidade da massa.

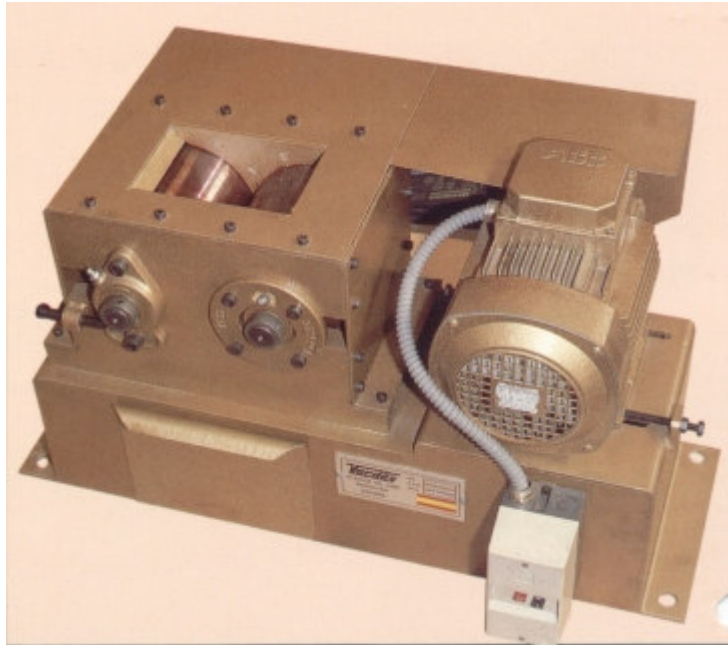


Figura 3.4 – Laminador de laboratório

Após a moagem, 6 amostras foram coletadas para a determinação da umidade inicial da argila (U_0), conforme a expressão:

$$U_0 = \frac{M_U - M_S}{M_S} \times 100 \quad \text{Equação 3. 1}$$

U_0 = umidade da argila, (%)

M_U = massa úmida da amostra de argila, em gramas

M_S = massa seca da amostra de argila, em gramas

Como toda a argila coletada apresentava umidade inferior à determinada para a extrusão, a correção da umidade foi feita adicionando-se água à massa. A quantidade de água de amassamento (A_A) a ser adicionada para atingir a umidade de extrusão (U_{EA}) foi determinada pela expressão:

$$A_A = M_U \times \left(\frac{100 + U_{EA}}{100 + U_0} - 1 \right) \quad \text{Equação 3. 2}$$

A_A = quantidade de água à ser adicionada à argila, em gramas

M_U = massa total úmida da argila, em gramas

U_{EA} = umidade de extrusão da argila, (%)

U_0 = umidade inicial da argila, (%)

A argila foi então acondicionada em um recipiente metálico, adicionada água e homogeneizada manualmente, conforme Figura 3.5. Após isto a argila foi levada novamente ao laminador com a finalidade de promover a homogeneização total da umidade. Então, foram coletadas mais 6 amostras da argila e determinada sua umidade para fins de verificação.

Ao efetuar o cálculo para determinar a quantidade de água a ser adicionada, conforme Equação 3.2, foi considerado um valor para U_{EA} um pouco maior que o considerado como ideal para a extrusão, pois durante o processo de moagem pelo laminador há perda de umidade.



Figura 3.5 – Correção da umidade e homogeneização manual da argila

3.4.2. Extrusão

Para a moldagem dos blocos foi utilizada uma extrusora de laboratório, dotada de câmara de vácuo e variador de velocidade de rotação das hélices, com pressão de trabalho de 2,0 MPa (Figura 3.6).

Com o misturador da extrusora ligado, a argila era introduzida aos poucos, e quando a massa começava a cair na câmara de vácuo, o sistema de vácuo era ligado. A massa que sai pela boquilha da extrusora deve apresentar uma consistência de pasta

rígida, com textura lisa e sem laminação ou denteados. Caso contrário, a massa deve retornar à extrusora para promover melhor mistura e homogeneização. Observa-se que a homogeneidade e umidade da massa, a boquilha, a pressão de trabalho, a pressão do vácuo e a velocidade de rotação da hélice são determinantes nas características da massa extrudada e devem estar bem ajustados.

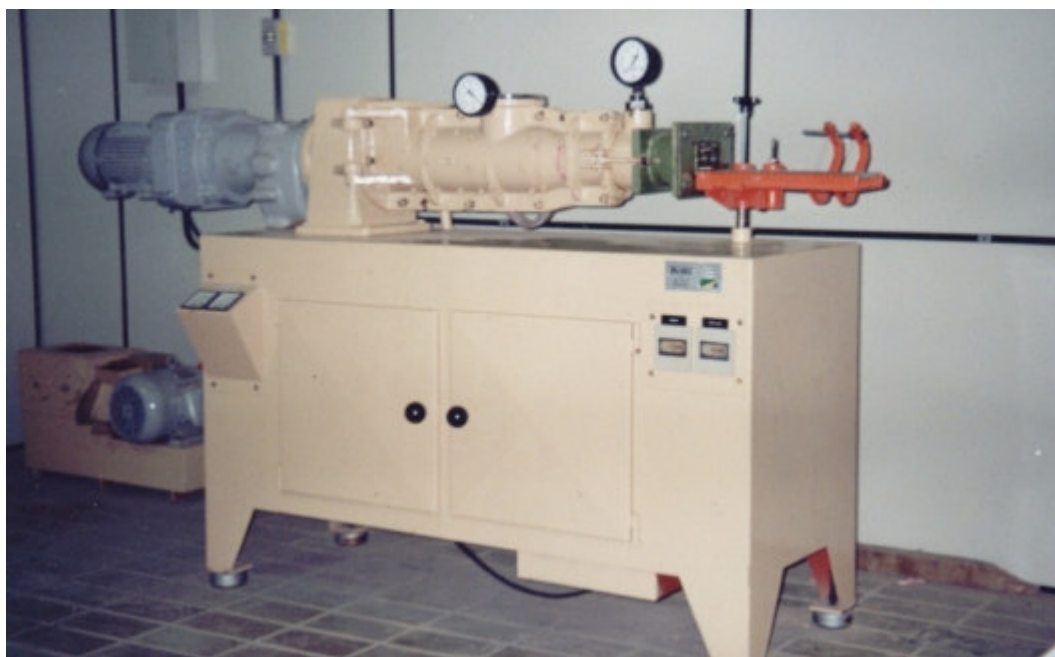


Figura 3.6 – Extrusora de laboratório

Um parâmetro para verificar e controlar a umidade de extrusão da argila é o peso úmido dos blocos após extrusão. Uma vez conhecido o peso dos blocos úmidos, para uma determinada umidade da argila, a mesma boquilha e a mesma extrusora, qualquer variação deste peso indica que há variação da umidade da argila, a qual deve ser corrigida.

A massa foi cortada com o auxílio de 2 arames de aço, com distância entre si pré-fixada, que determina a altura dos blocos (Figura 3.7). Quanto menor for o diâmetro dos arames de aço e mais tencionados estiverem, mais perfeita será a superfície de corte, com menor ocorrência de rebarbas nos blocos. Porém, arames com diâmetros muito reduzidos, rompem quando tencionados e fixados. Foram utilizados arames de aço com diâmetro de 0,5 mm.

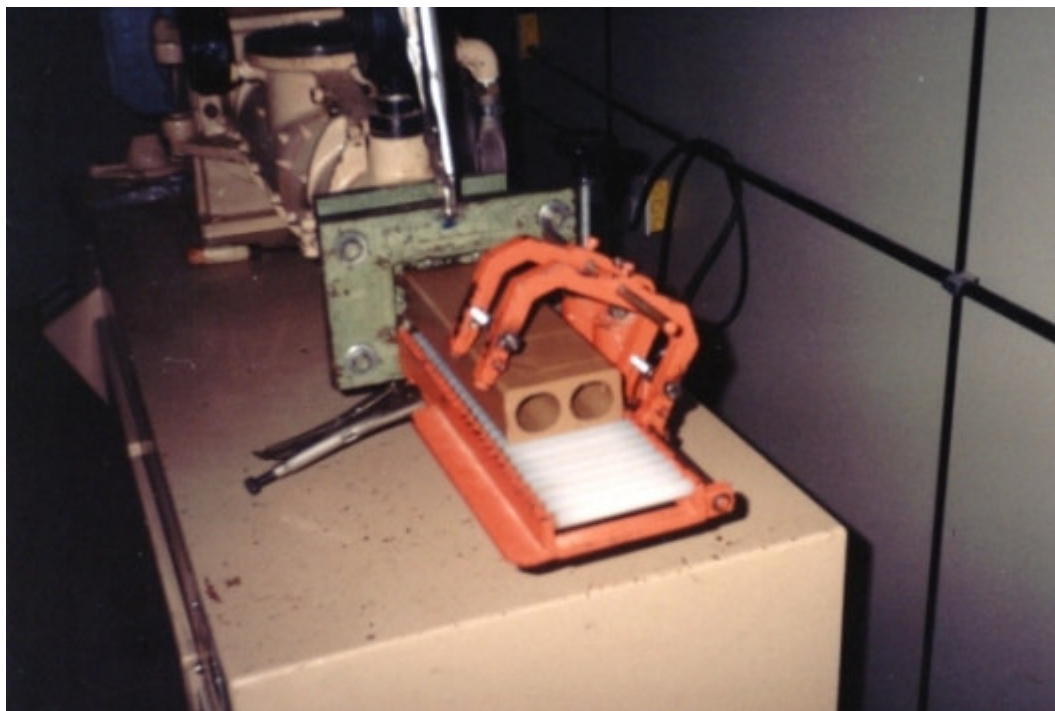


Figura 3.7 – Corte dos blocos após extrusão

Devido ao calor produzido pelo atrito das hélices e a pressão na câmara de extrusão, a massa rapidamente perde umidade após sair pela boquilha da extrusora. Portanto, imediatamente após o corte, os corpos de prova destinados aos ensaios de caracterização física e mecânica foram numerados com um estilete metálico, pesados, medidos e acondicionados em bandejas metálicas. A massa úmida de extrusão (M_{EB}) foi determinada com balança eletrônica com precisão de 0,1 g. A largura (L), altura (A) e comprimento (C) foram determinados com auxílio de um paquímetro, com precisão de 0,1 mm.

3.4.3. Secagem

A operação de secagem deve retirar unicamente a água que resta na massa após a extrusão. Inicialmente deve ser lenta e uniforme, a fim de que a água seja eliminada igualmente de toda a massa. Quando a secagem do material se inicia muito rápida, podem ocorrer deformações e trincas dos blocos durante o processo, ou até mesmo posteriormente, durante a queima. Após ultrapassar o período no qual a retração linear é constante, pode-se acelerar o processo de secagem, diminuindo o tempo e aumentando a

temperatura. A curva de secagem depende da geometria dos blocos e das características da argila.

Após a extrusão, os blocos foram expostos ao ar para secagem até completar o período de secagem à taxa constante, quando a massa úmida de cor escura se torna clara, sem manchas de umidade na superfície. Os blocos foram então colocados na estufa elétrica à 70 °C por no mínimo 12 horas. Aumentava-se a temperatura para 105 °C \pm 5 °C, permanecendo por no mínimo 12 horas.

Os corpos de prova destinados aos ensaios de caracterização física e mecânica foram pesados e medidos para posterior determinação da umidade de extrusão (U_{EB}) e retração linear de secagem (R_S). A massa após secagem (M_{SS}) foi determinada com balança eletrônica de precisão de 0,1 g. A largura (L), altura (A) e comprimento (C) foram determinados com auxílio de um paquímetro, com precisão de 0,1 mm.

3.4.4. Queima

Após a secagem, seguiu-se a queima dos blocos, que foi processada com um forno elétrico de laboratório, tipo mufla, dotado de controlador programável de temperatura (Figura 3.8).

As velocidades de aquecimento foram as seguintes: 10 °C/min até 500 °C; 2,5 °C/min entre 500 °C e 600 °C; e, 10 °C/min até o patamar de queima.

Para o estudo com diferentes umidades de extrusão da argila, foi adotado um patamar de queima de 930 °C durante 2 horas.

Foram estudados 4 diferentes tempos de patamar de queima: 1, 2, 3 e 4 horas, sendo produzidos um total de 30 corpos de prova. A temperatura do patamar de queima utilizado foi de 930 °C.

Também foram estudados 5 diferentes temperaturas de patamar de queima: 910 °C, 930 °C, 950 °C, 970 °C e 990 °C, utilizando um tempo de patamar de 2 horas. Para este estudo foram produzidos 30 corpos de prova.

Outra variável analisada foi a quantidade de blocos queimados no forno. As quantidades estudadas foram: 10, 30 e 50 blocos. Os blocos foram queimados à 930 °C durante 2 horas.

O resfriamento foi realizado lentamente até o dia seguinte. Após a temperatura atingir menos de 200 °C abriu-se a porta do forno.



Figura 3.8 – Processo de queima, forno elétrico tipo mufla

Após o resfriamento, os corpos de prova foram pesados e medidos para a determinação da perda ao fogo (PF) e retração linear de queima (R_Q). A massa seca após queima (M_Q) foi determinada com balança eletrônica de precisão de 0,1 g. A largura (L), altura (A) e comprimento (C) foram determinados com auxílio de um paquímetro, com precisão de 0,1 mm.

Posteriormente foram determinadas as características: absorção de água (AA), massa específica aparente (ME_A), área líquida ($A_{Líq}$) e resistência à compressão bruta (RC_B).

3.5. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS BLOCOS

3.5.1. Umidade de Moldagem

Após a secagem, com os resultados das pesagens realizadas, a umidade de extrusão dos blocos (U_{EB}) foi obtida pela seguinte expressão:

$$U_{EB} = \frac{M_E - M_{SS}}{M_{SS}} \times 100 \quad \text{Equação 3. 3}$$

U_{EB} = umidade de extrusão dos blocos, (%)

M_E = massa do corpo de prova úmido após extrusão, em gramas

M_{SS} = massa do corpo de prova seco após secagem, em gramas

3.5.2. Retração Linear de Secagem

Após a secagem, com os resultados das medições realizadas, a retração linear de secagem (R_S) foi obtida para cada dimensão dos blocos (largura, altura e comprimento), de acordo com a expressão:

$$R_S = \frac{L_E - L_S}{L_E} \times 100 \quad \text{Equação 3. 4}$$

R_S = retração linear de secagem, (%)

L_E = medida do corpo de prova úmido após extrusão, mm

L_S = medida do corpo de prova após secagem, mm

3.5.3. Perda ao Fogo

Após a queima, com os resultados das pesagens realizadas, foi determinada a perda ao fogo (PF), que indica a perda de massa dos blocos durante a queima. Esta foi obtida pela seguinte expressão:

$$PF = \frac{M_{SS} - M_Q}{M_{SS}} \times 100 \quad \text{Equação 3. 5}$$

PF = perda ao fogo, (%)

M_{SS} = massa do corpo de prova seco após secagem, em gramas

M_Q = massa do corpo de prova após queima, em gramas

3.5.4. Retração Linear de Queima

Após a queima, com os resultados das medições realizadas, a retração linear de queima (R_Q) foi obtida para cada dimensão dos blocos (largura, altura e comprimento), de acordo com a expressão:

$$R_Q = \frac{L_S - L_Q}{L_S} \times 100 \quad \text{Equação 3. 6}$$

R_Q =retração linear de queima, (%)

L_S = medida do corpo de prova após secagem, mm

L_Q = medida do corpo de prova após queima, mm

3.5.5. Absorção de Água

Após ficarem submersos em água durante 24 horas, os corpos de prova foram pesados, com precisão de 0,1 g, para determinar a massa saturada (M_{SAT}). A absorção de água (AA) foi determinada pela expressão:

$$AA = \frac{M_{SAT} - M_Q}{M_Q} \times 100 \quad \text{Equação 3. 7}$$

AA = absorção de água, (%)

M_{SAT} = massa do corpo de prova saturado, em gramas

M_Q = massa do corpo de prova após queima, em gramas

3.5.6. Massa Específica Aparente e Área Líquida

Após a determinação da massa saturada (M_{SAT}), os corpos de prova foram imersos em água e o peso imerso (M_i) foi determinado com uma balança hidrostática, com precisão de 0,1 g. A massa específica aparente (ME_A) e a área líquida (A_{Liq}) dos corpos de prova foram determinados com as seguintes expressões:

$$ME_A = \frac{M_Q}{M_{SAT} - M_i} \quad \text{Equação 3. 8}$$

$$A_{Liq} = \frac{M_{SAT} - M_i}{A} \quad \text{Equação 3. 9}$$

ME_A = massa específica aparente, g/cm³

A_{Liq} = área líquida, cm²

M_Q = massa do corpo de prova seco após queima, em gramas

M_{SAT} = massa do corpo de prova saturado, em gramas

M_i = massa do corpo de prova saturado e imerso em água, em gramas

A = Altura do corpo de prova após queima, cm

3.5.7. Resistência à Compressão na Área Bruta

Os ensaios de compressão dos blocos foram realizados conforme o método de ensaios NBR 6461 (ABNT, 1983). A pasta de cimento utilizada para o capeamento dos corpos de prova teve uma incorporação de 30% de areia fina, afim de evitar as trincas de retração do capeamento e obter uma superfície mais uniforme. Após a secagem do capeamento, os corpos de prova foram imersos em água durante 24 horas, sendo em seguida submetidos ao ensaio de compressão. A velocidade de carregamento utilizada foi de 500 N/seg. A resistência à compressão na área bruta (RC_B) dos blocos foi determinada pela expressão:

$$RC_B = \frac{F}{L \times C} \quad \text{Equação 3. 10}$$

RC_B = resistência à compressão na área bruta, MPa

F = carga máxima de compressão, N

L = largura do corpo de prova seco após queima, mm

C = comprimento do corpo de prova seco após queima, mm

4. ESTUDO DE CASO: INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DOS BLOCOS NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Este estudo de caso tem o objetivo de avaliar a sensibilidade do uso de protótipos em escala reduzida para o desenvolvimento de produtos para uso em alvenaria estrutural. O tema escolhido para tal foi o estudo da influência da geometria dos blocos cerâmicos na resistência à compressão. Foram realizados ensaios de resistência à compressão de blocos, prismas de 3 blocos e de paredinhas. Foi também determinada a curva tensão x deformação destas últimas.

Neste Capítulo são descritos os procedimentos de moldagem dos prismas e paredinhas, os procedimentos de dosagem da argamassa e os métodos de ensaio empregados.

4.1. UNIDADES

Neste estudo foram desenvolvidos quatro geometrias diferentes de blocos, e o fator de escala adotado para a fabricação dos blocos foi 1/3.

A norma NBR 8042 (ABNT, 1992) especifica que os blocos estruturais devem possuir a forma de um paralelepípedo retângulo, sendo que a largura (L) dos blocos é a dimensão da menor aresta da face perpendicular aos furos, a altura (A) é a dimensão da aresta paralela ao eixo dos furos e, o comprimento é a dimensão da maior aresta da face perpendicular aos furos. Porém a norma não faz menção à geometria dos furos dos blocos, a qual será objeto deste estudo. Basicamente, este estudo propõe-se a comparar o comportamento mecânico entre blocos de furos prismáticos e blocos de furos arredondados.

Foi adotada uma geometria de bloco com dimensões de 42x57x87 mm, com dois furos retangulares, um septo central e espessura de paredes de 7,5 mm, denominada de geometria “A”. Esta geometria foi definida com base nos blocos estruturais comercialmente produzidos pela empresa na qual foi coletada a argila.

Duas geometrias de blocos com furos arredondados foram desenvolvidas. Uma apresenta, nos pontos de menor seção, espessura de parede igual aos blocos com geometria A e com maior área líquida, a qual foi denominada de geometria “B”. A outra foi desenvolvida de forma a ter a mesma área líquida da geometria A, com espessura de paredes de 5,7 mm, nos pontos de menor seção, e que foi denominada de geometria “C”.

Uma quarta geometria foi desenvolvida com dois furos quadrados, dois septos centrais separados por um rasgo de 3 mm, e espessura das paredes de 7,5 mm, denominada de geometria “D”. Com estes dois septos centrais consegue-se a total sobreposição de todos os septos transversais na moldagem contrafiada de paredes e, desta forma, esperava-se uma melhor eficiência da resistência à compressão das paredinhas. O rasgo central que divide os dois septos possui espessura igual à junta vertical de assentamento e desta forma mantém a espessura das paredes do bloco igual em toda a sua seção, proporcionando uma secagem e queima uniformes.

A Figura 4.1 mostra as formas e dimensões das 4 quatro geometrias de blocos desenvolvidas.

Para a moldagem das paredinhas foi necessário desenvolver um meio-bloco para cada uma das geometrias descritas anteriormente, de forma a possibilitar o assentamento contrafiado em fiadas alternadas. A Figura 4.2 mostra a forma e dimensões dos meio-blocos.

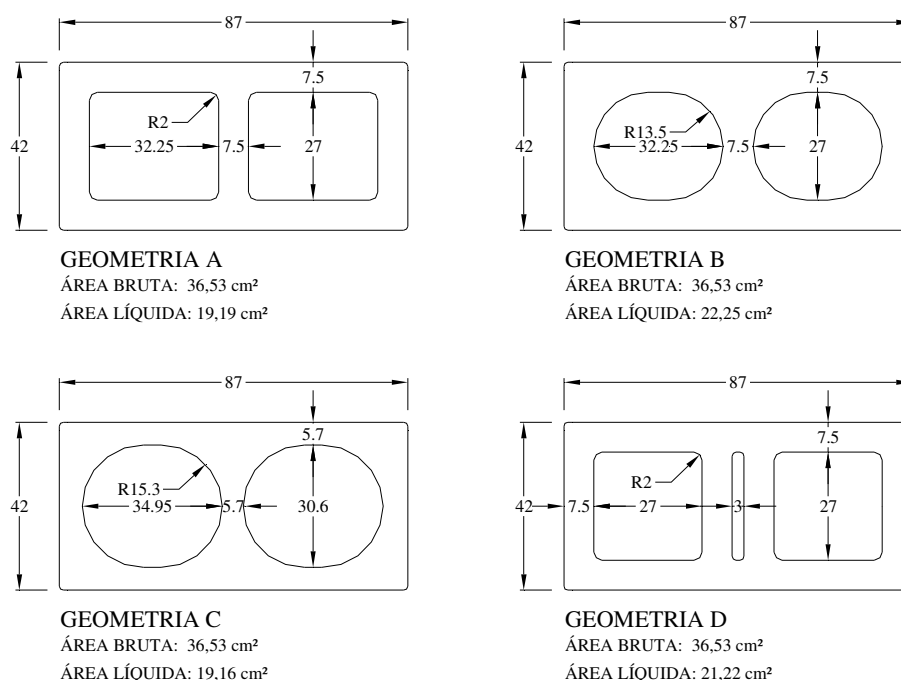


Figura 4.1 – Forma e dimensões (mm) dos blocos inteiros, em escala reduzida

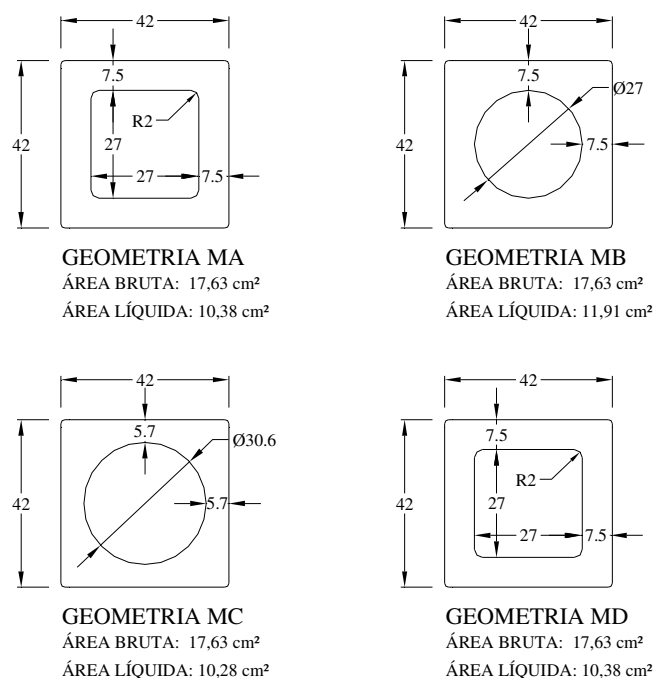


Figura 4.2 – Forma e dimensões (mm) dos meio-blocos, em escala reduzida

As características físicas e mecânicas dos blocos produzidos foram determinadas conforme os procedimentos descritos no Capítulo 3, as quais são: umidade de extrusão, retração linear de secagem, perda ao fogo, retração linear de queima, absorção de água, massa específica aparente, área líquida e resistência à compressão na área bruta. Devido às diferentes áreas líquidas das geometrias em estudo, também foi determinada a resistência à compressão líquida dos blocos.

4.2. FABRICAÇÃO DOS BLOCOS

Os blocos foram fabricados em laboratório conforme os procedimentos descritos no Capítulo 3. Devido à dificuldade de se manusear grandes quantidades de argila, foi estabelecido um máximo de 20 kg de argila úmida para cada moldagem. Para evitar a variação das características físicas e mecânicas dos blocos devido à grande quantidade de blocos no forno, foi estabelecido um máximo de 25 blocos inteiros para cada queima.

Para produzir o total de blocos para os ensaios de caracterização, moldagem dos prismas e moldagem das paredinhas, devido aos limites estabelecidos anteriormente, foram necessárias um total de 11 moldagens, e, para cada moldagem foram realizadas

duas queimas. A Tabela 4.1 apresenta as quantidades de blocos das diversas geometrias produzidos em cada moldagem.

Tabela 4.1 – Cronograma de fabricação dos blocos

Moldagem	Geometria	Quantidade de blocos moldados			Total
		para ensaios de caracterização	para moldagem de prismas	para moldagem de paredinhas	
1 ^a	A	10	-	-	40
	B	10	-	-	
	C	10	-	-	
	D	10	-	-	
2 ^a	A	6	19	-	50
	B	6	19	-	
3 ^a	C	6	19	-	50
	D	6	19	-	
4 ^a	A	6	-	44	50
	MA	6	-	12	18
5 ^a	A	6	-	44	50
	MA	6	-	12	18
6 ^a	B	6	-	44	50
	MB	6	-	12	18
7 ^a	B	6	-	44	50
	MB	6	-	12	18
8 ^a	C	6	-	44	50
	MC	6	-	12	18
9 ^a	C	6	-	44	50
	MC	6	-	12	18
10 ^a	D	6	-	44	50
	MD	6	-	12	18
11 ^a	D	6	-	44	50
	MD	6	-	12	18
TOTAL		160	76	448	684

4.3. ARGAMASSA

Para a moldagem da argamassa foram utilizados os seguintes materiais:

- areia média lavada e peneirada;
- cimento portland CP I-S-32;
- cal hidratada CH III.

A norma NBR 8798 (ABNT, 1985) determina que as proporções dos materiais, para a mistura da argamassa, pode ser experimental ou não experimental.

A dosagem experimental só pode ser utilizada em obras de pequeno vulto, onde a resistência característica máxima para prisma oco é 3,0 MPa e para prisma cheio é 6,0 MPa, e o controle de resistência é dispensado.

A norma não especifica qual o método a ser utilizado na dosagem experimental, podendo ser utilizado qualquer método baseado na correlação entre resistência e o fator água/cimento, levando-se em consideração a consistência e trabalhabilidade da mistura.

A norma britânica BS 5628 (BSI, 1992) especifica diversas proporções de argamassas para assentamento de alvenaria estrutural, levando em consideração as características dos componentes da mistura, resistência à compressão desejada, rigidez da argamassa no estado endurecido, e condições de exposição às intempéries. A Tabela 4.2 apresenta as classes de argamassa e as correspondentes proporções em volume dos materiais utilizados.

Neste estudo foi utilizada a argamassa tipo (ii) da norma britânica, cujo traço em volume é 1 : 1/2 : 4,5, considerada uma argamassa de média resistência e de uso comum nas obras de alvenaria estrutural brasileiras.

Tabela 4.2 – Traços de argamassa para alvenaria (BS 5628)

Classe	Proporção em volume da argamassa			Resistência à Compressão aos 28 dias (MPa)	
	cimento	cal	areia	Laboratório	Obra
(i)	1	0 à 1/4	3	16,0	11,0
(ii)	1	1/2	4 à 4,5	6,5	4,5
(iii)	1	1	5 à 6	3,6	2,5
(iv)	1	2	8 à 9	1,5	1,0

Para a determinação da curva granulométrica da areia, devido ao fator de escala utilizado neste estudo, estabeleceu-se o diâmetro máximo da areia como sendo de 1,2 mm, que corresponde à 25% do diâmetro máximo estipulado pela norma britânica BS 1200 (BSI, 1976). A curva granulométrica adotada corresponde ao limite superior da faixa estipulada pela BS 1200. A Tabela 4.3 apresenta os limites da faixa granulométrica da norma britânica e a curva granulométrica adotada.

Tabela 4.3 – Granulometria da areia

Peneira – abertura nominal (em mm)	Porcentagem (em peso) passante nas peneiras	
	Limites da BS – 1200	Utilizada
4,8	100	100
2,4	90 – 100	100
1,2	70 – 100	100
0,6	40 – 80	80
0,3	5 – 40	40
0,15	0 - 10	10

A areia foi previamente lavada e seca em estufa à temperatura de 105 ± 5 °C. Após, a areia foi peneirada e as frações retidas em cada peneira foram separadas e acondicionadas em sacos plásticos para não adquirir a umidade do ar. Para a preparação da argamassa, as frações foram devidamente proporcionadas para obter a curva granulométrica desejada.

A determinação da massa unitária da areia e dos aglomerantes foi realizada conforme o método de ensaio da norma NBR 7251 (ABNT, 1982), e os valores obtidos são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Massa unitária dos materiais, em g/cm³

Cimento Portland CP I-S	Cal hidratada CH III	Areia
1,14	0,73	1,47

A consistência da argamassa e o fator água/cimento ($f_{a/c}$) foram definidos através do ensaio da mesa de consistência (flow table). A Tabela 4.5 mostra o traço convertido de volume para massa, o fator água/cimento e a consistência da argamassa.

Tabela 4.5 – Características da argamassa

Traço em volume	Traço em massa	$f_{a/c}$ médio	Consistência
1 : 1/2 : 4,5	1 : 0,32 : 5,8	1,4	315 ± 5 mm

4.4. PRISMAS

Prismas são protótipos simples e econômicos para a determinação do comportamento mecânico da alvenaria.

A norma brasileira NBR 8215 (ABNT, 1983) para blocos de concreto prescreve a utilização de 2 blocos de altura com uma junta horizontal; a norma americana ASTM E 447 (1984) recomenda que os prismas tenham pelo menos duas juntas de argamassa horizontal. Diversos pesquisadores (MENDES, 1998) recomendam a utilização de pelo menos três blocos de altura, pois são mais representativos do comportamento da alvenaria, uma vez que o bloco do meio fica livre do confinamento imposto pelos pratos da prensa.

As juntas horizontais foram executadas com 3 mm de espessura, que corresponde à uma junta de 10 mm em escala real.

Para cada geometria de blocos foram moldados 6 prismas compostos de 3 fiadas assentadas à prumo, com argamassamento total da superfície dos blocos.

Os prismas foram moldados sobre uma bancada lisa e nivelada e coberta por um plástico. O prumo e nível do prisma foram controlados com a utilização de esquadro e nível de bolha. O primeiro bloco foi assentado sobre uma pasta de cimento com areia fina, e 24 horas após a moldagem a superfície superior do prisma foi capeada.



Figura 4.3 – Prismas de 3 blocos

Os prismas foram submetidos ao ensaio de compressão aos 28 dias de idade à contar da data de moldagem. A velocidade de carregamento utilizada foi $0,25 \pm 0,05$ MPa/s.

Foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos de 5 x 10 cm para determinar a resistência à compressão da argamassa, rompidos na mesma data dos prismas.

4.5. PAREDINHAS

Normalmente os valores de resistência à compressão de blocos, prismas e argamassas são utilizados, em várias normas, no cálculo da tensão admissível das paredes, por serem simples de serem determinados. Porém, não refletem o real comportamento mecânico da alvenaria. Assim, são de vital importância os ensaios de paredinhas para estabelecer a relação entre a resistência de paredes e a resistência de blocos, prismas e argamassa. GOMES (1986) cita que “o ensaio de paredes é recomendável em todos os casos; esses ensaios são indispensáveis quando ocorrem mudanças na geometria dos tijolos ou blocos ou no caso da construção com um novo produto cerâmico”.

A norma NBR 8949 (ABNT, 1985) prescreve os métodos de moldagem e ensaio de paredes de blocos cerâmicos submetidas à compressão axial. Para que os corpos de prova sejam representativos da estrutura real, devem ter dimensões mínimas de 1,20 x 2,60 m (largura x altura) e a influência dos materiais e da mão de obra devem ser minimizados.

Para cada geometria de blocos foram moldadas 4 paredinhas, com dimensões de 36 x 36 cm, que correspondem às dimensões de 1,20 x 1,20 m em escala real. A argamassa foi assentada em toda a superfície dos blocos e as juntas verticais foram totalmente preenchidas.

As juntas horizontais e verticais foram executadas com 3 mm de espessura.

As paredinhas foram moldadas sobre uma bancada lisa e nivelada, coberta por um plástico. Para minimizar os efeitos da influência da mão de obra, foi construído um aparato de madeira para auxiliar na moldagem das paredinhas. Todas as paredinhas foram moldadas pelo mesmo técnico.

O aparato utilizado na moldagem, o qual está ilustrado na Figura 4.4, consiste de duas hastes verticais fixadas perpendicularmente à duas travessas em sua base. As duas hastes são ligadas entre si através de duas réguas fixadas nas travessas da base e uma régua no topo das hastes. Estas hastes têm a função de garantir o prumo na execução das paredinhas e a distância entre estas define a largura da paredinhas. Após as hastes estarem corretamente aprumadas, o conjunto é firmemente fixado na bancada. Foram feitas marcas à cada 60 mm nas hastes, que irão definir a altura de assentamento de cada fiada. Duas réguas, que deslizam através de rasgos feitos nas hastes e são fixados em cada marcação de altura de fiada através de parafusos, têm a função de controlar a espessura de assentamento da argamassa e manter o nível e o alinhamento das fiadas. A altura de assentamento das fiadas são fixas, à cada 60 mm, e, portanto, as pequenas variações de altura dos blocos são absorvidas pelas juntas de argamassa.

A superfície superior das paredinhas foi regularizada e nivelada com uma pasta de cimento e areia fina.

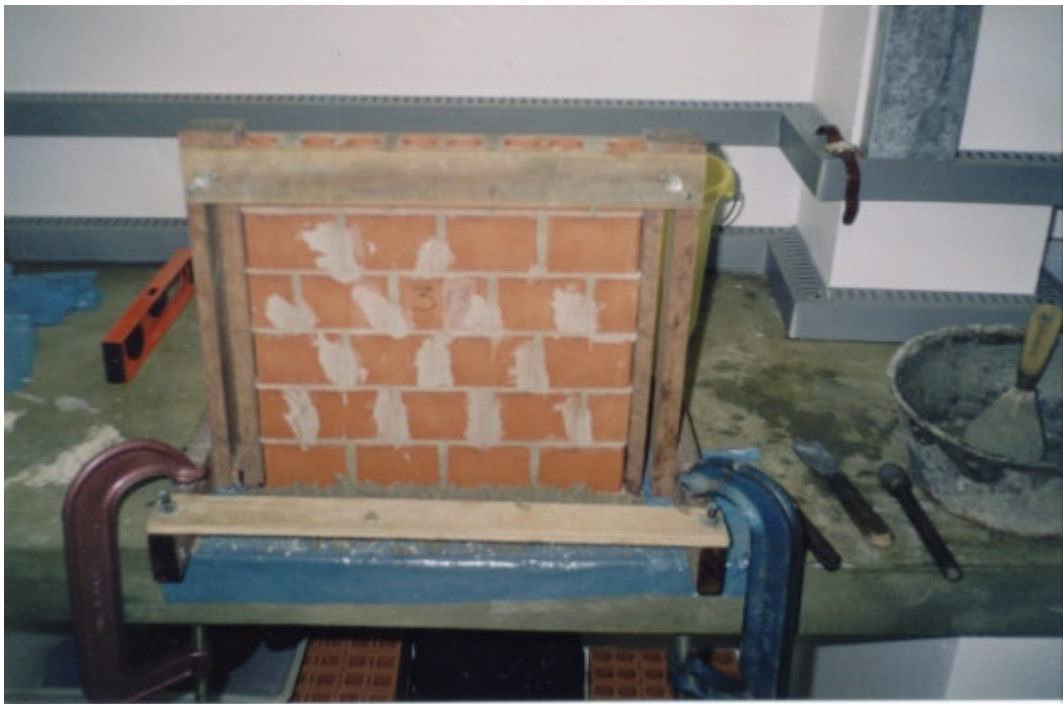


Figura 4.4 – Aparato para a moldagem das paredinhas

As paredinhas foram submetidas ao ensaio de compressão aos 28 dias de idade, à contar da data de moldagem. Para distribuir a carga aplicada foram utilizadas placas

de aço com 20 mm de espessura, colocadas na base e no topo das paredinhas. A velocidade de carregamento utilizada foi $0,25 \pm 0,05$ MPa/s.

Para cada paredinha construída foi moldado um corpo de prova de argamassa cilíndrico de 5 x 10 cm para determinação da resistência à compressão, rompidas na mesma data das paredinhas.

Para a determinação da curva tensão x deformação das paredinhas, das quatro paredinhas moldadas para cada geometria, um teve as deformações longitudinais transversais monitoradas através de um extensômetro mecânico, tipo “demec-gauge”.

Foram definidos 10 pontos de medida, “demec-points”, nas duas faces das paredinhas, caracterizados por pastilhas metálicas coladas nas paredinhas. Foram monitoradas 5 bases de medida longitudinais e 2 bases de medida transversais, com comprimento de 20 cm. A Figura 4.5 mostra as bases de medida definidas para o monitoramento das deformações.

As leituras das deformações foram realizadas à cada 2 kN de carga aplicada até serem atingidos 10 kN. A partir de então, as leituras foram realizadas à cada 5 kN aplicados até o surgimento das primeiras trincas.

Com os resultados das leituras, foram definidas as curvas tensão x deformação e os módulos de elasticidade das paredinhas.

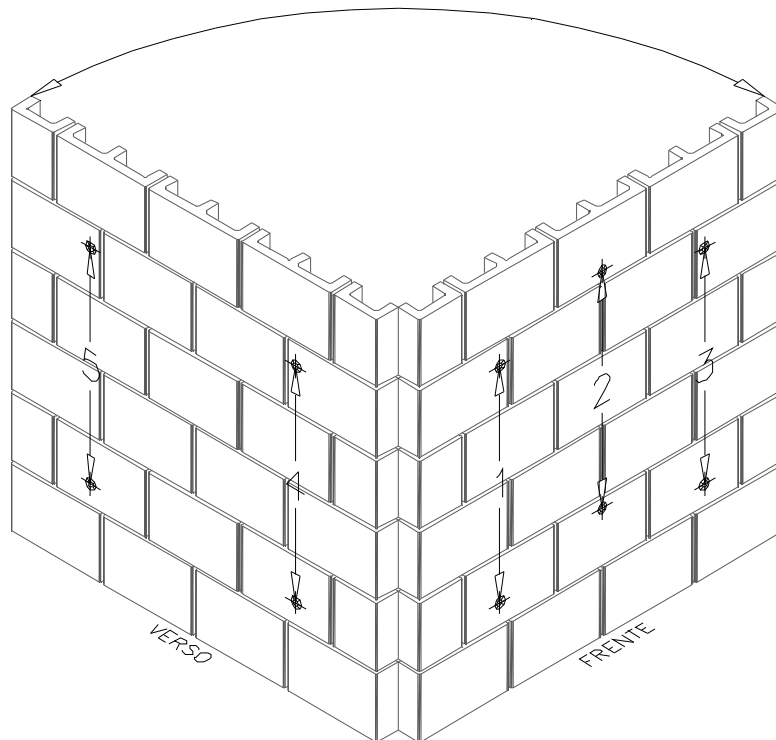


Figura 4.5 – Esquema de monitoramento de deformações das paredinhas

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados dos estudos experimentais descritos nos Capítulos 3 e 4.

No Capítulo 3 apresentou-se o processo de fabricação de blocos em laboratório, e diversas variáveis de fabricação foram estudadas, as quais são: tempo de queima, temperatura de queima, umidade de extrusão e quantidade de blocos no forno.

No Capítulo 4 estudou-se o programa experimental para estudo da influência da geometria dos blocos na resistência à compressão. Foram realizados ensaios em blocos, prismas e paredinhas.

Para avaliar a influência das diversas variáveis estudadas nos resultados médios obtidos nos ensaios, foram realizadas análises estatísticas por comparação múltipla de médias pelo teste ANOVA (análise de grupos com níveis fixos). O teste ANOVA proporciona a avaliação da influência das variáveis, quando avaliadas isoladamente ou em conjunto. Com este teste pode-se afirmar se as variáveis têm ou não influência dentro do estudo realizado, com determinado fator de confiabilidade.

A análise estatística gera dois valores, denominados “F” e “ $F_{crít}$ ”, este último dependente do nível de confiabilidade utilizado. Em todas as análises realizadas neste trabalho utilizou-se uma confiabilidade de 95%. Comparando os valores, se $F > F_{crít}$, pode-se afirmar que a variável considerada influi significativamente para um nível de significância de 5%. Se $F < F_{crít}$, pode-se afirmar que a variável não influi significativamente. Quanto maior a diferença entre F e $F_{crít}$, maior é a influência da variável analisada.

5.1. INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE FABRICAÇÃO

5.1.1. Tempo de Queima

Foram utilizados 4 diferentes tempos de patamar de queima: 1, 2, 3 e 4 horas. Para cada tempo de queima, 6 corpos de prova foram submetidos aos ensaios de caracterização física e mecânica. A temperatura de queima utilizada foi 930 °C. Na Tabela 5.1 são apresentados os resultados médios obtidos dos ensaios, com seus respectivos coeficientes de variação (CV), assim como os resultados da análise estatística de comparação de médias.

Tabela 5.1 – Características dos blocos para diferentes tempos de queima

Ensaio		Tempo de patamar de queima, em horas				F	F _{crít}	Conclusão
		1	2	3	4			
Umidde de extrusão (%)	Média	32,09	32,09	32,05	32,04	0,44	3,01	não há ≠
	CV	0,25%	0,40%	0,37%	0,36%			
Retração linear de secagem (%)	Comp.	Média	6,18	6,15	6,16	0,28	3,01	não há ≠
		CV	1,87%	1,71%	1,52%			
	Larg.	Média	6,73	6,94	6,86	1,37	3,01	não há ≠
		CV	3,19%	3,09%	3,69%			
	Alt.	Média	7,50	7,58	7,41	2,69	3,01	não há ≠
		CV	1,13%	1,88%	1,71%			
Perda ao fogo (%)	Média	6,92	6,96	6,97	7,07	8,57	3,01	há ≠
	CV	0,82%	1,06%	0,57%	0,84%			
Retração linear de queima (%)	Comp.	Média	1,10	1,24	1,32	11,44	3,01	há ≠
		CV	7,71%	5,18%	8,62%			
	Larg.	Média	1,73	1,59	1,59	0,47	3,01	não há ≠
		CV	12,89%	11,05%	20,31%			
	Alt.	Média	0,92	0,89	1,14	6,84	3,01	há ≠
		CV	9,18%	13,40%	11,94%			
Absorção de água (%)	Média	19,27	19,07	18,96	18,94	24,82	3,01	há ≠
	CV	0,46%	0,36%	0,38%	0,45%			
Massa espec. aparente (g/cm³)	Média	1,783	1,791	1,795	1,797	9,54	3,01	há ≠
	CV	0,31%	0,24%	0,32%	0,30%			
Área líquida (cm²)	Média	18,78	18,69	18,70	18,66	3,47	3,01	há ≠
	CV	0,29%	0,39%	0,41%	0,52%			
Resistência à compressão bruta (MPa)	Média	25,72	26,98	27,49	25,65	1,86	3,01	não há ≠
	CV	6,96%	5,72%	7,60%	6,43%			

Analizando as variâncias dos resultados dos ensaios de umidade de extrusão dos blocos e de retração de secagem, observa-se que não há diferença significativa entre os resultados para os diferentes tempos de queima, e, portanto, não deve haver influência significativa da umidade de extrusão nos resultados dos demais ensaios.

Para os ensaios de retração de queima, em relação à largura, e resistência à compressão, a análise das variâncias indica que não há influência significativa do tempo de queima. Para os demais ensaios, observa-se que o tempo de queima influencia significativamente nos resultados.

Observando a Figura 5.1, verifica-se que há um aumento da perda ao fogo para maiores tempos de patamar de queima. Como consequência, o esperado seria que a retração de queima também tivesse um aumento gradual com o aumento do tempo de queima, porém, observando os resultados médios de retração de queima, esta relação não pode ser estabelecida.

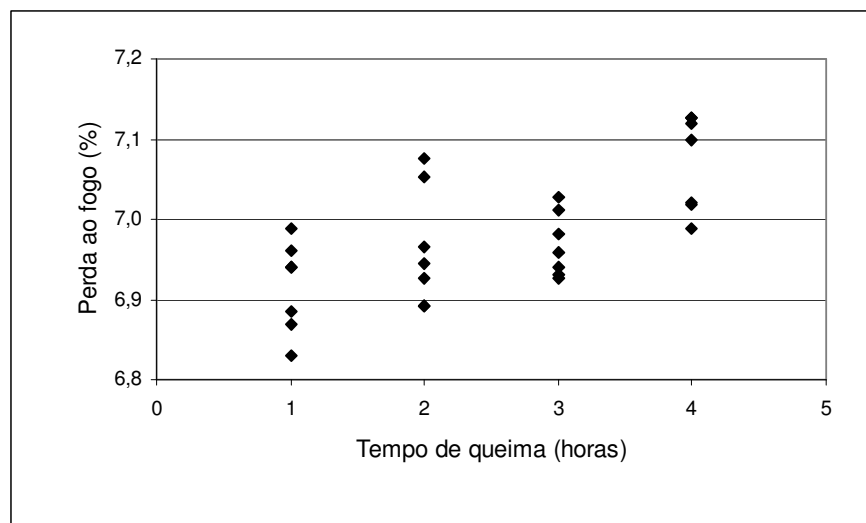


Figura 5.1 – Influência do tempo de queima na perda ao fogo

A Figura 5.2 e a Figura 5.3 mostram os resultados obtidos, respectivamente, da absorção de água e área líquida, e verifica-se para ambos que os valores diminuem à medida que aumenta o tempo de patamar de queima. Porém, esta redução tende à ser muito pequena à partir de 2 horas de queima.

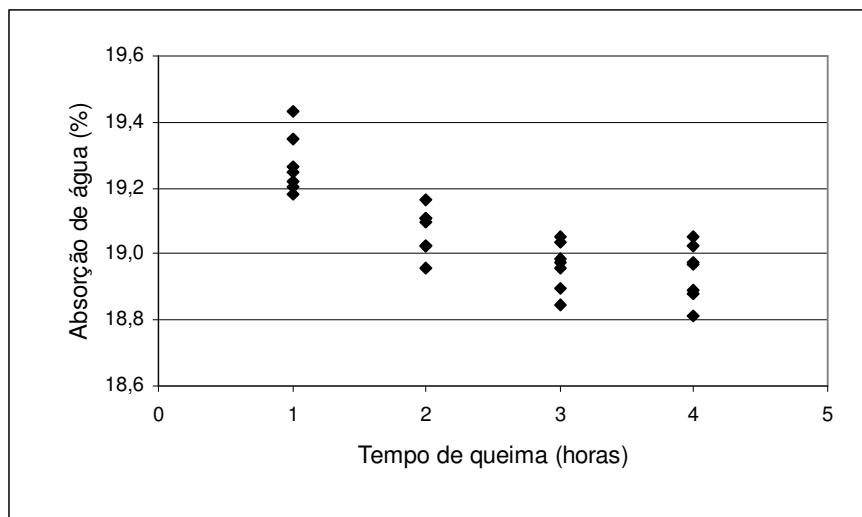


Figura 5.2 – Influência do tempo de queima na absorção de água

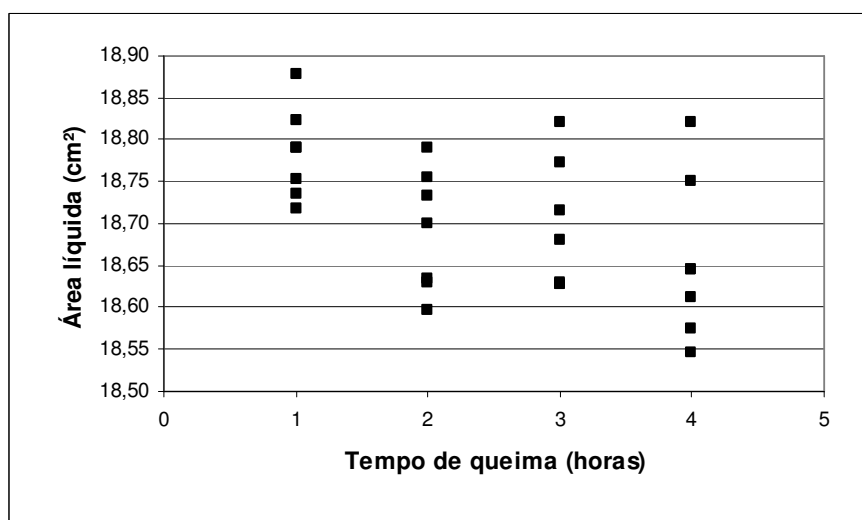


Figura 5.3 – Influência do tempo de queima na área líquida

Há um acréscimo da massa específica aparente com o aumento do tempo de patamar de queima, conforme se pode observar na Figura 5.4. Este acréscimo é maior quando do aumento de 1 para 2 horas de queima.

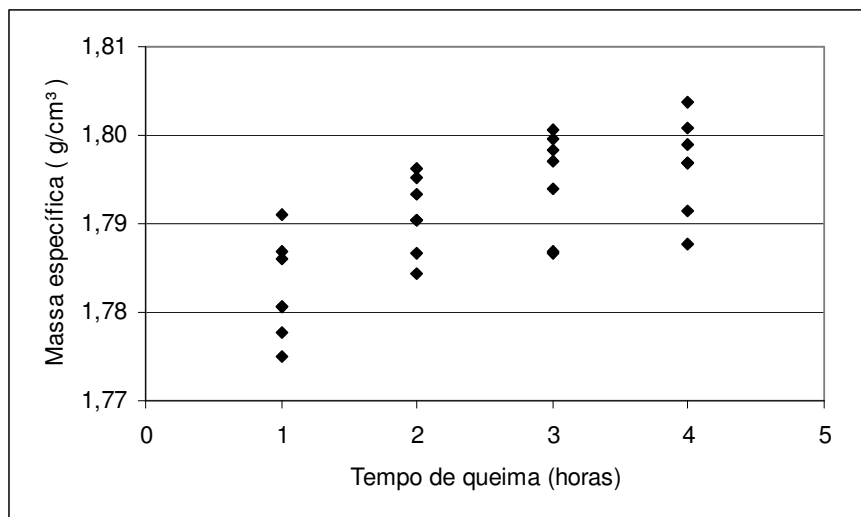


Figura 5.4 – Influência do tempo de queima na massa específica aparente

5.1.2. Temperatura de Queima

Foram utilizados 5 diferentes temperaturas de patamar de queima: 910 °C, 930 °C, 950 °C, 970 °C e 990 °C. O tempo de queima utilizado foi de 2 horas. Para cada temperatura de queima, 6 corpos de prova foram submetidos aos ensaios de caracterização física e mecânica. Na Tabela 5.2 são apresentados os resultados médios obtidos dos ensaios, com seus respectivos coeficientes de variação (CV), assim como os resultados da análise estatística de comparação de médias.

Analisando as variâncias dos resultados dos ensaios de umidade de extrusão dos blocos e de retração de secagem, observa-se que não há diferença significativa entre os resultados para as diferentes temperaturas de queima, e, portanto, não deve haver influência significativa da umidade de extrusão nos resultados dos demais ensaios.

Para os demais ensaios, perda ao fogo, retração linear de queima, absorção de água, área líquida, massa específica aparente e resistência à compressão, a análise das variâncias indica que há influência significativa da temperatura de queima nos resultados.

Observando a Figura 5.5, verifica-se que há um pequeno aumento nos valores de perda ao fogo à medida que aumenta a temperatura de queima até 970 °C, sendo que à 990 °C se apresenta um valor menor do que 970 °C.

Tabela 5.2 – Características dos blocos para diferentes temperaturas de queima

Ensaio		Temperatura de patamar de queima, °C					F	F _{crit}	Conclusão
		910	930	950	970	990			
Umidde de extrusão (%)	Média	31,67	31,59	31,63	31,65	31,64	0,32	2,76	não há ≠
	CV	0,29%	0,44%	0,37%	0,49%	0,41%			
Retração linear de secagem (%)	Comp.	Média	5,57	5,61	5,54	5,57	0,49	2,76	não há ≠
		CV	1,56%	2,29%	1,18%	1,90%			
	Larg.	Média	6,49	6,31	6,34	6,45	0,47	2,76	não há ≠
		CV	2,78%	4,84%	3,60%	5,44%			
	Alt.	Média	7,08	7,10	7,00	7,11	0,53	2,76	não há ≠
		CV	1,72%	1,44%	2,38%	1,39%			
Perda ao fogo (%)	Média	6,90	6,93	7,01	7,11	7,05	9,49	2,76	há ≠
	CV	1,05%	1,05%	0,82%	0,80%	1,13%			
Retração linear de queima (%)	Comp.	Média	1,05	1,32	1,73	2,33	336,91	2,76	há ≠
		CV	11,01%	12,77%	3,34%	2,46%			
	Larg.	Média	1,62	2,20	2,48	3,07	51,93	2,76	há ≠
		CV	14,21%	17,20%	11,43%	10,55%			
	Alt.	Média	0,81	1,07	1,33	1,91	218,39	2,76	há ≠
		CV	17,43%	12,08%	10,55%	0,07%			
Absorção de água (%)	Média	18,67	18,14	17,57	16,68	14,97	598,90	2,76	há ≠
	CV	0,61%	0,49%	0,78%	1,08%	1,22%			
Massa espec. aparente (g/cm³)	Média	1,799	1,812	1,832	1,864	1,911	370,54	2,76	há ≠
	CV	0,33%	0,28%	0,27%	0,37%	0,29%			
Área líquida (cm²)	Média	18,69	18,61	18,42	18,21	17,89	324,06	2,76	há ≠
	CV	0,18%	0,25%	0,20%	0,22%	0,33%			
Resistência à compressão bruta (MPa)	Média	24,19	23,83	27,92	32,10	37,02	39,97	2,76	há ≠
	CV	8,66%	6,87%	5,01%	3,95%	9,67%			

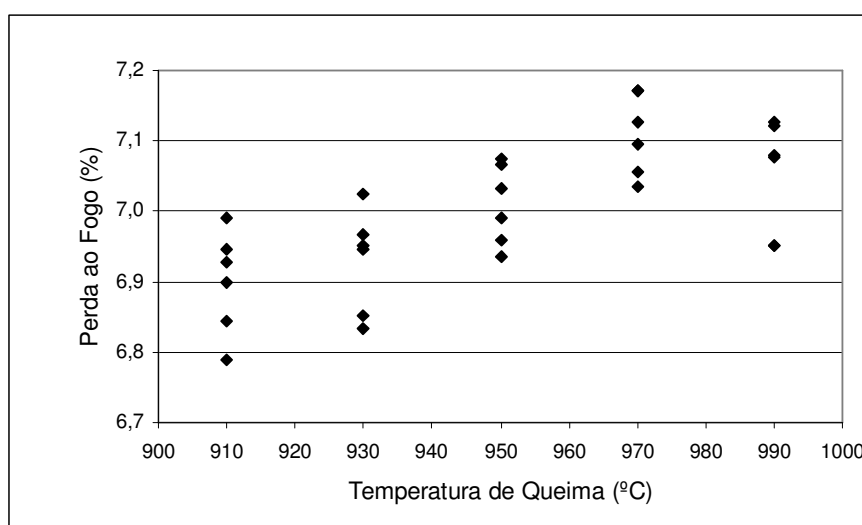


Figura 5.5 – Influência da temperatura de queima na perda ao fogo

A retração de queima e a massa específica aparente também apresentaram um aumento considerável dos seus valores à medida que aumenta a temperatura de queima, como pode ser observado na Figura 5.6 e na Figura 5.7. Verifica-se que o aumento da massa específica aparente com o aumento da temperatura de queima segue uma tendência exponencial.

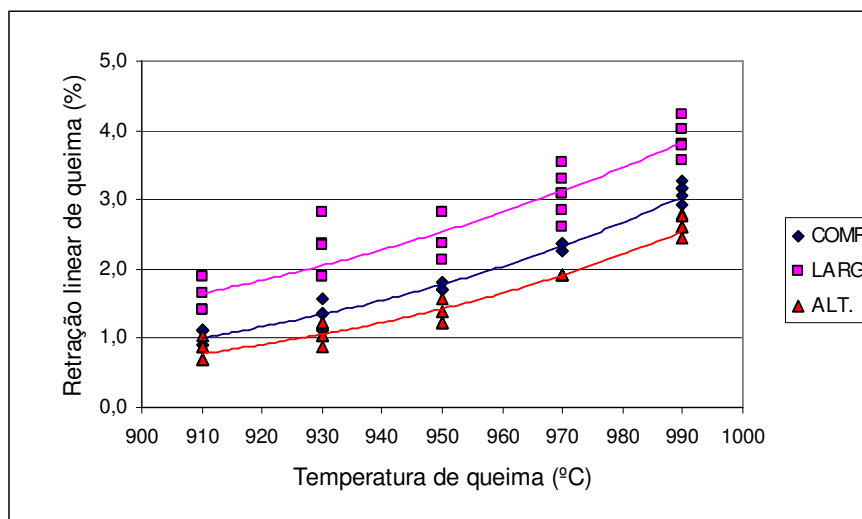


Figura 5.6 – Influência da temperatura de queima na retração de queima

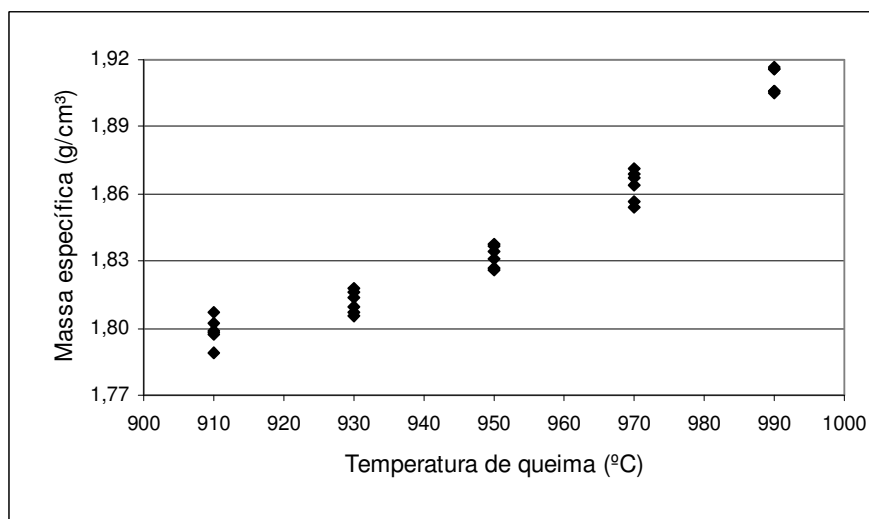


Figura 5.7 – Influência da temperatura de queima na massa específica aparente

A Figura 5.8 e a Figura 5.9 mostram que há uma redução dos valores de absorção de água e área líquida à medida que aumenta a temperatura de queima. Observa-se que há uma redução de absorção de água consideravelmente grande com o aumento da temperatura de queima.

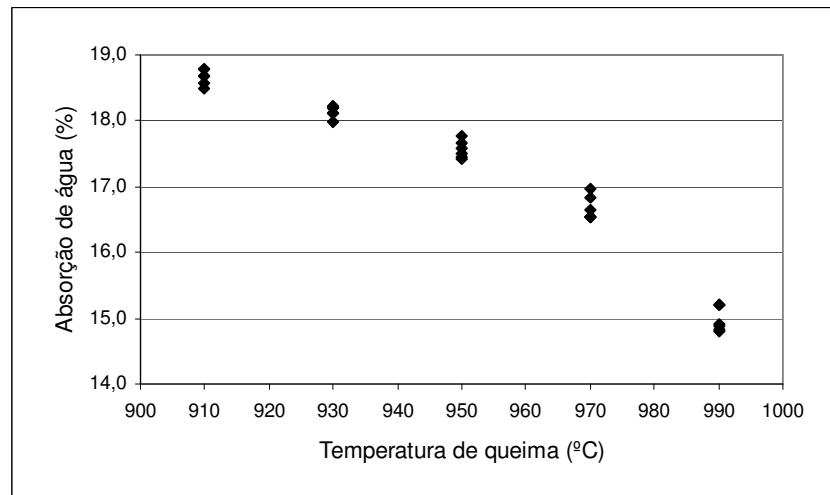


Figura 5.8 – Influência da temperatura de queima na absorção de água

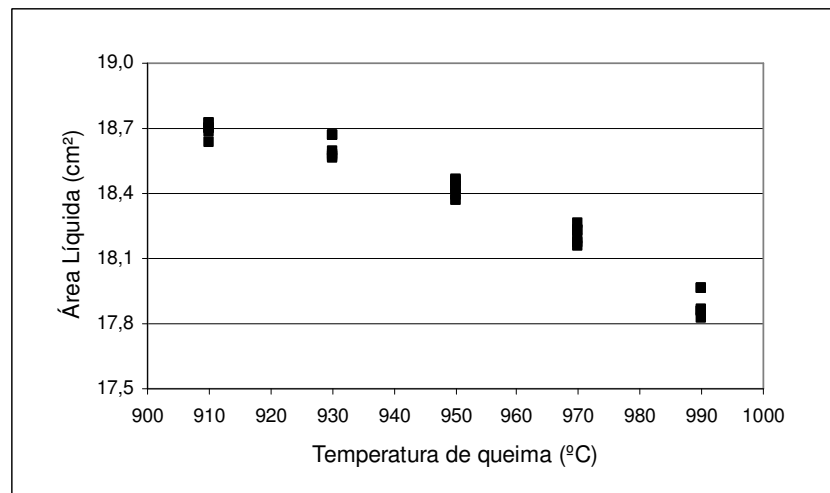


Figura 5.9 – Influência da temperatura de queima na área líquida

Observando os valores médios de resistência à compressão verifica-se que há um acréscimo com o aumento da temperatura de queima, com exceção da resistência à 930 °C, que apresentou um valor ligeiramente inferior à resistência à 910 °C. A Figura 5.10 mostra a tendência de crescimento da resistência à compressão à medida que aumenta a temperatura de queima.

De uma forma geral, pode-se afirmar que aumentando a temperatura de queima dos blocos, ocorrem transformações químicas e físicas da massa cerâmica que resultam em perda e retração de massa (menor área líquida) acompanhada de redução de poros vazios (menor absorção de água), tornando o material mais compacto (maior massa específica) e com maior resistência à compressão.

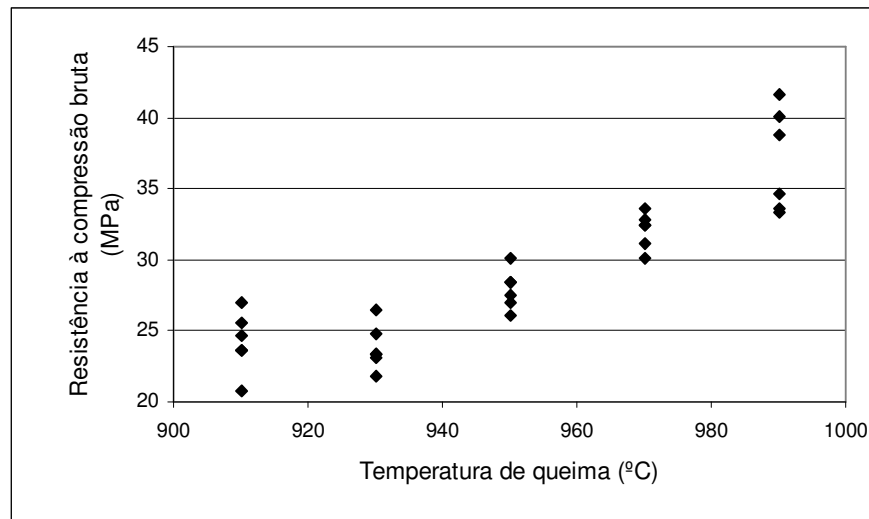


Figura 5.10 – Influência da temperatura de queima na resistência à compressão

5.1.3. Umidade de Extrusão

Durante o processo de fabricação dos blocos, foram obtidos 5 patamares de umidade de extrusão distintos. Os blocos foram queimados à uma temperatura de 930 °C com tempo de patamar de 2 horas. Para cada patamar de umidade, 6 corpos de prova foram submetidos aos ensaios de caracterização física e mecânica. Na Tabela 5.3 são apresentados os resultados médios obtidos dos ensaios, com seus respectivos coeficientes de variação (CV), assim como os resultados da análise estatística de comparação de médias.

Analisando as variâncias dos resultados dos ensaios de umidade de extrusão dos blocos, observa-se que há diferença significativa entre as médias das umidades dos 5 patamares obtidos.

Para todos os ensaios, retração linear de secagem, perda ao fogo, retração linear de queima, absorção de água, área líquida, massa específica aparente e resistência à compressão, a análise das variâncias indica que há influência significativa da umidade de extrusão nos resultados.

Verifica-se que há um aumento da retração de secagem dos blocos à medida que aumenta a umidade de extrusão, seguindo uma tendência linear, conforme é observado na Figura 5.11.

Quanto a perda ao fogo e retração de queima, a influência da umidade de extrusão é muito pequena, praticamente não havendo diferença entre os valores.

Tabela 5.3 – Características dos blocos para diferentes umidade de extrusão

Ensaio		Patamar de umidade					F	F _{crit}	Conclusão
		A	B	C	D	E			
Umidade de extrusão (%)	Média	34,41	32,84	31,90	31,47	30,33	707,27	2,76	há ≠
	CV	0,54%	0,31%	0,27%	0,53%	0,46%			
Retração linear de secagem (%)	Comp.	Média	6,65	6,29	5,94	5,77	195,37	2,76	há ≠
		CV	1,64%	1,29%	0,72%	2,16%			
	Larg.	Média	7,66	7,14	7,08	6,84	15,61	2,76	há ≠
		CV	3,09%	3,00%	0,11%	2,44%			
	Alt.	Média	8,01	7,50	7,21	7,00	69,27	2,76	há ≠
		CV	1,06%	2,18%	2,23%	2,26%			
Perda ao fogo (%)	Média	7,11	7,16	7,09	7,15	7,13	3,08	2,76	há ≠
	CV	0,19%	0,55%	0,68%	0,81%	0,49%			
Retração linear de queima (%)	Comp.	Média	1,27	1,44	1,26	1,41	6,60	2,76	há ≠
		CV	3,61%	6,39%	13,20%	4,49%			
	Larg.	Média	1,84	2,11	2,18	2,50	6,45	2,76	há ≠
		CV	21,06%	8,62%	8,19%	5,09%			
	Alt.	Média	0,94	1,23	1,14	1,13	3,63	2,76	há ≠
		CV	15,15%	8,98%	12,80%	12,88%			
Absorção de água (%)	Média	19,29	18,41	17,90	17,87	17,14	74,15	2,76	há ≠
	CV	0,46%	2,10%	0,95%	0,44%	1,46%			
Massa espec. aparente (g/cm³)	Média	1,784	1,811	1,825	1,828	1,850	44,85	2,76	há ≠
	CV	0,39%	0,75%	0,20%	0,20%	0,64%			
Área líquida (cm²)	Média	18,31	18,41	18,44	18,47	18,45	4,36	2,76	há ≠
	CV	0,43%	0,40%	0,16%	0,25%	0,63%			
Resistência à compressão bruta (MPa)	Média	25,16	25,42	28,11	27,78	30,34	4,59	2,80	há ≠
	CV	9,61%	9,07%	8,06%	6,23%	9,76%			

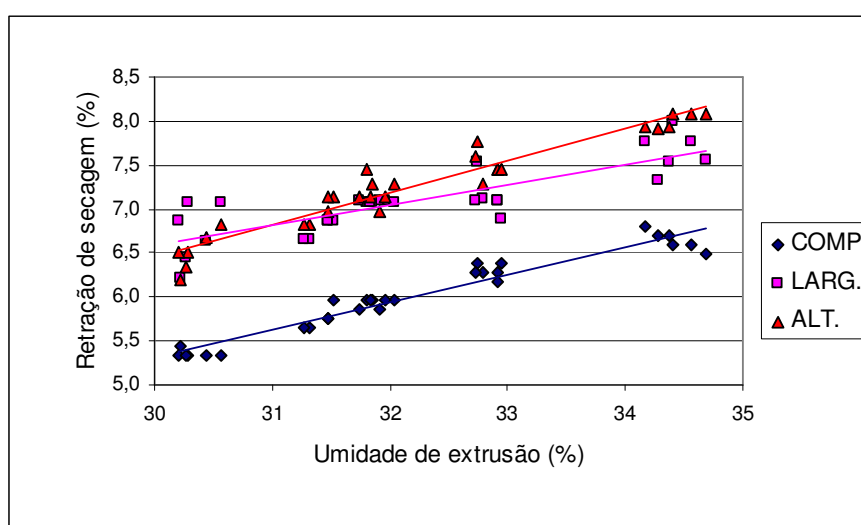


Figura 5.11 – Influência da umidade de extrusão na retração de secagem

Observando a Figura 5.12, verifica-se que há uma pequena influência da umidade de extrusão na área líquida dos blocos. Há uma pequena redução da área líquida à medida que reduz a umidade de extrusão.

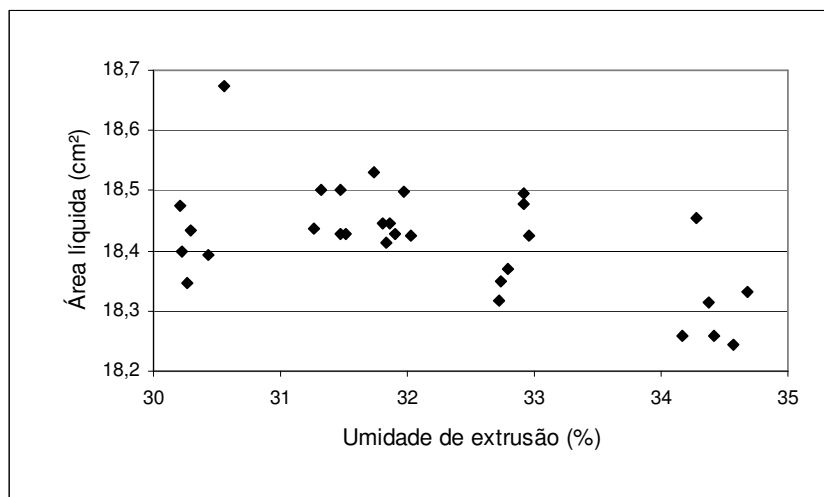


Figura 5.12 – Influência da umidade de extrusão na área líquida

Verifica-se que há uma significativa redução da absorção de água e um significativo aumento da massa específica aparente com a redução da umidade de extrusão, seguindo relações lineares, conforme mostram a Figura 5.13 e Figura 5.14. Isto pode ser facilmente compreendido, pois com a redução da umidade, diminui a quantidade de vazios deixados pela água que evapora durante o processo de secagem, reduzindo a absorção de água e proporcionando um material mais compacto (maior massa específica).

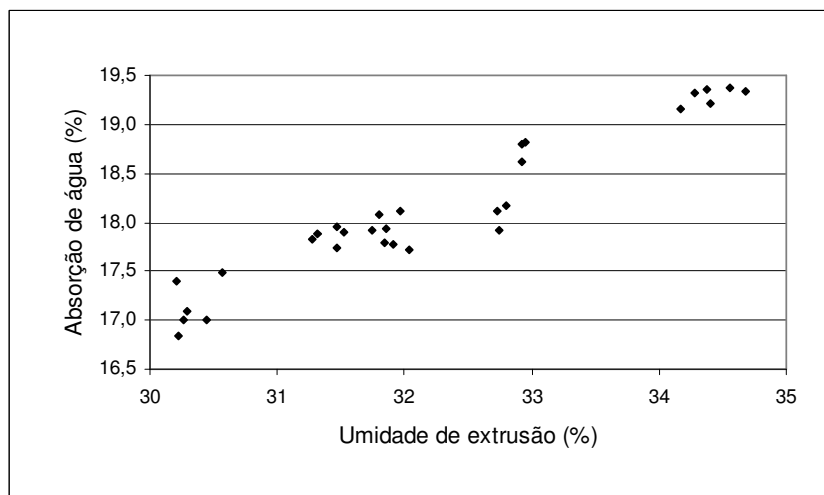


Figura 5.13 – Influência da umidade de extrusão na absorção de água

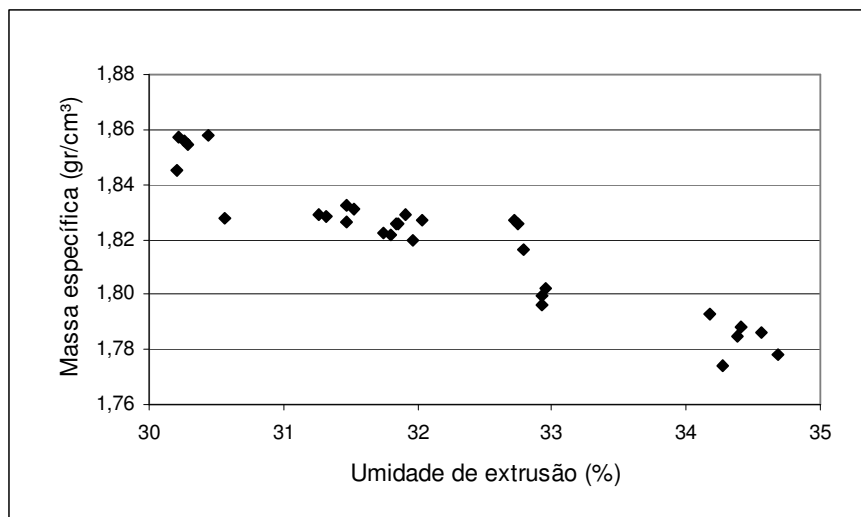


Figura 5.14 – Influência da umidade de extrusão na massa específica aparente

Os valores médios de resistência à compressão apresentados na Tabela 5.3 mostram que a influência da umidade de extrusão é pequena, e, conforme se observa na Figura 5.15, há um aumento linear da resistência à compressão à medida que diminui a umidade de extrusão.

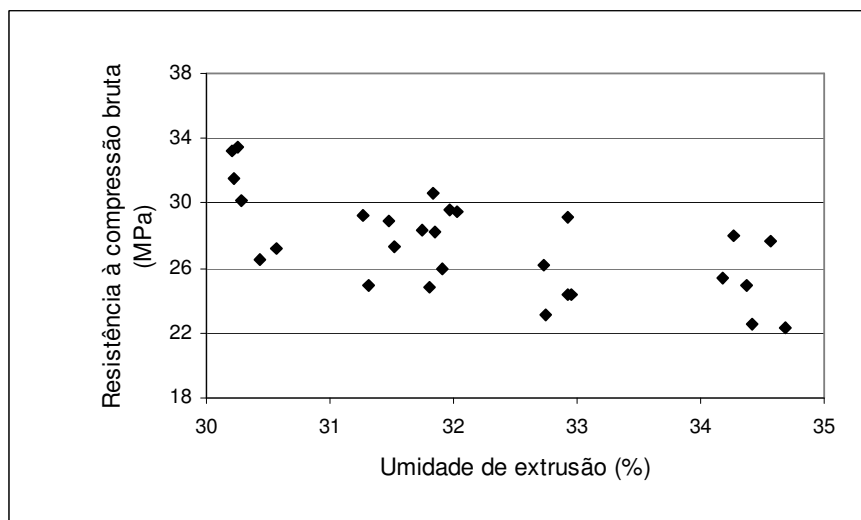


Figura 5.15 – Influência da umidade de extrusão na resistência à compressão

5.1.4. Quantidade de Blocos no Forno

Para avaliar a influência da quantidade de blocos no forno nas características físicas e mecânicas dos mesmos, foram realizadas 3 queimas, variando o número de

blocos no forno em 10, 30 e 50. A temperatura de queima utilizada foi de 930 °C com tempo de patamar de 2 horas. Para cada queima, 5 corpos de prova foram submetidos aos ensaios de caracterização física e mecânica. Na Tabela 5.4 são apresentados os resultados médios obtidos dos ensaios, com seus respectivos coeficientes de variação (CV), assim como os resultados da análise estatística de comparação de médias.

Tabela 5.4 – Características dos blocos para diferentes quantidades de blocos no forno

Ensaio		Quantidade de blocos no forno			F	F _{crít}	Conclusão
		10	30	50			
Umidade de extrusão (%)	Média	31,01	30,98	30,78	0,23	3,89	não há ≠
	CV	1,89%	1,71%	2,18%			
Retração linear de secagem (%)	Comp.	Média	5,59	5,65	0,48	3,89	não há ≠
		CV	3,41%	2,99%			
	Larg.	Média	7,08	7,34	0,84	3,89	não há ≠
		CV	3,07%	3,91%			
	Alt.	Média	6,99	6,86	0,40	3,89	não há ≠
		CV	3,98%	2,68%			
Perda ao fogo (%)	Média	7,13	7,15	7,18	2,22	3,89	não há ≠
	CV	0,45%	0,65%	0,37%			
Retração linear de queima (%)	Comp.	Média	1,19	1,26	21,70	3,89	há ≠
		CV	10,62%	23,02%			
	Larg.	Média	1,09	2,19	15,64	3,89	há ≠
		CV	24,63%	23,35%			
	Alt.	Média	0,59	1,15	13,41	3,89	há ≠
		CV	26,29%	31,30%			
Absorção de água (%)	Média	19,14	17,85	15,68	37,13	3,89	há ≠
	CV	0,67%	2,83%	6,25%			
Massa espec. aparente (g/cm³)	Média	1,801	1,828	1,889	39,28	3,89	há ≠
	CV	0,27%	0,67%	1,30%			
Área líquida (cm²)	Média	18,70	18,53	18,15	16,36	3,89	há ≠
	CV	0,52%	0,40%	1,31%			
Resistência à compressão bruta (MPa)	Média	22,85	26,82	29,19	5,13	3,89	há ≠
	CV	11,10%	15,22%	9,05%			

Analisando as variâncias dos resultados dos ensaios de umidade de extrusão dos blocos e de retração de secagem, observa-se que não há diferença significativa entre os resultados para as diferentes quantidades de blocos queimadas, e, portanto, não deve haver influência significativa da umidade de extrusão nos resultados dos demais ensaios.

Para os ensaios de perda ao fogo, a análise das variâncias indica que não há influência significativa da quantidade de blocos no forno, porém, observa-se um pequeno acréscimo dos valores médios à medida que aumenta a quantidade de blocos no forno. Para os demais ensaios, observa-se que a quantidade de blocos no forno influencia significativamente os resultados.

Observando os resultados dos ensaios de retração de queima, massa específica aparente e resistência à compressão, verifica-se que há um aumento dos valores com o aumento da quantidade de blocos no forno, conforme mostram a Figura 5.16, a Figura 5.17 e a Figura 5.18.

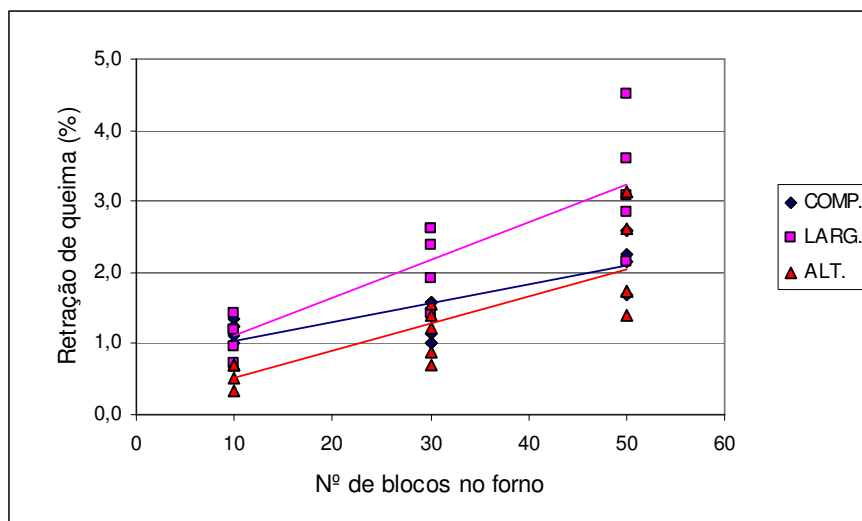


Figura 5.16 – Influência do número de blocos no forno na retração de queima

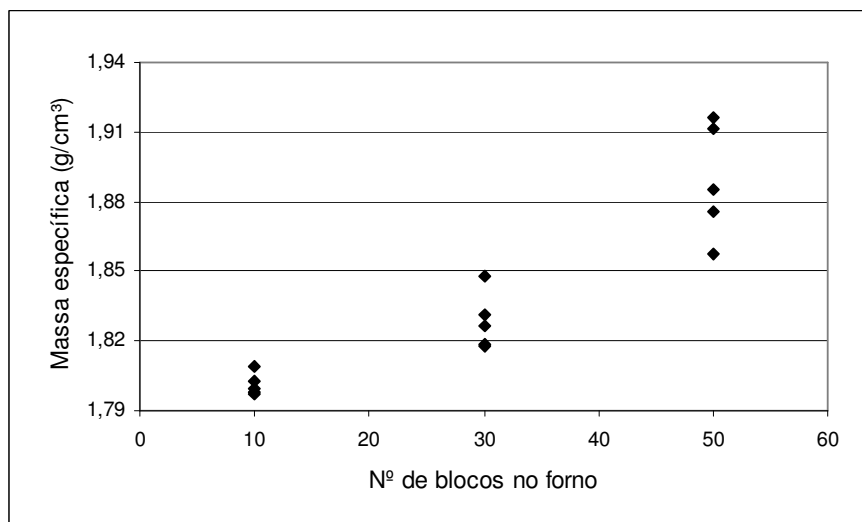


Figura 5.17 – Influência do número de blocos no forno na massa específica aparente

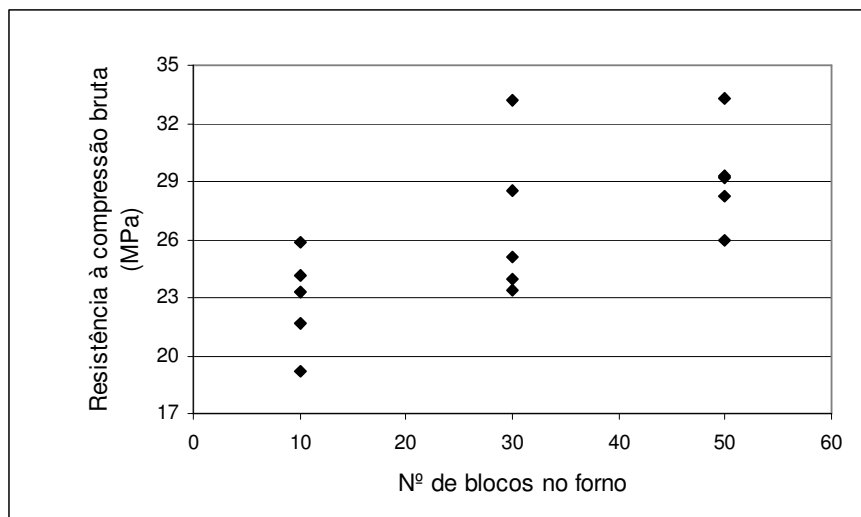


Figura 5.18 – Influência do número de blocos no forno na resistência à compressão

Nos ensaios de absorção de água e área líquida, verifica-se que há uma redução dos valores com o aumento da quantidade de blocos no forno, conforme mostram a Figura 5.19 e Figura 5.20.

Um fato importante observado nos resultados dos ensaios de retração de queima, absorção de água e massa específica aparente, é o significativo aumento da variabilidade dos resultados à medida que aumenta a quantidade de blocos no forno. Para justificar esta variabilidade, considera-se que, quando há uma grande quantidade de blocos no forno há uma diferença no comportamento físico e químico dos blocos mais externos à pilha formada dentro do forno em relação aos mais internos à pilha devido à diferenças de concentração de calor durante o processo de resfriamento do forno. Ou seja, os blocos mais externos à pilha resfriam mais rapidamente que os blocos mais internos.

Observa-se também, que à medida que se aumenta a quantidade de blocos no forno, os blocos mais internos da pilha se mantêm próximos do patamar de queima por um tempo maior assim que o forno é desligado e tem início o processo de resfriamento. Em função disto, os valores médios obtidos nos ensaios de retração de queima, massa específica aparente, resistência à compressão, absorção de água e área líquida quando se aumento a quantidade de blocos no forno, têm comportamento semelhante ao obtido quando se aumenta o tempo de patamar de queima (item 5.1.1).

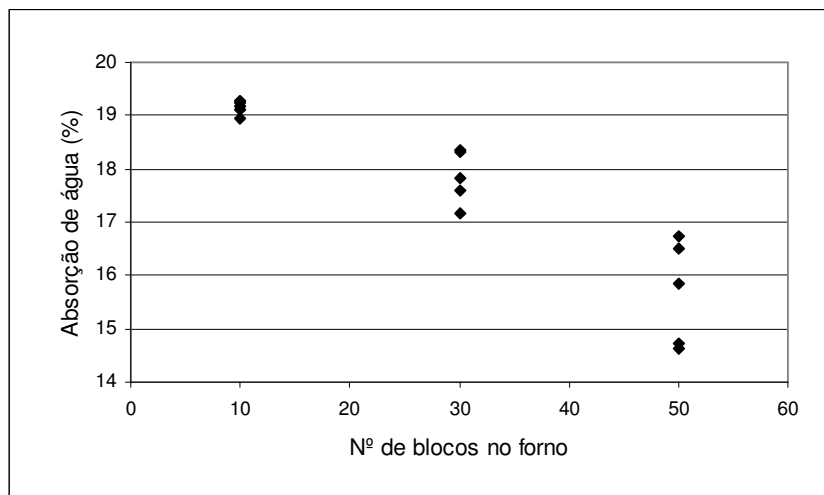


Figura 5.19 – Influência do número de blocos no forno na absorção de água

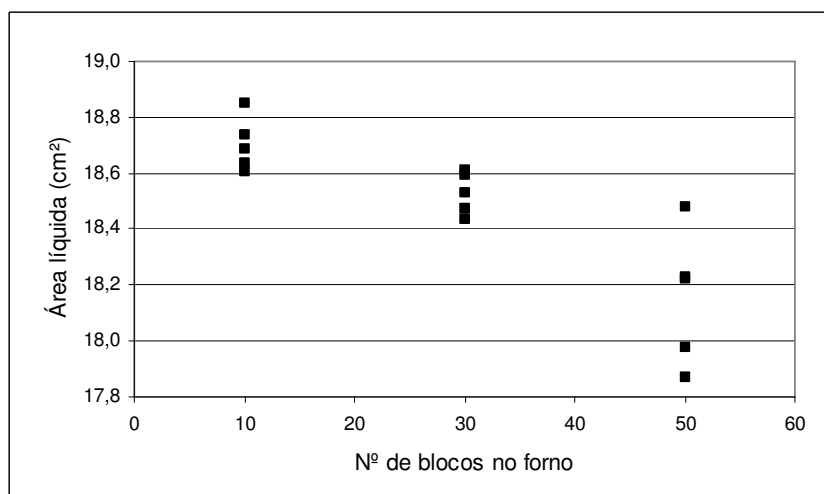


Figura 5.20 – Influência do número de blocos no forno na área líquida

5.1.5. Relações entre Absorção de Água, Massa Específica Aparente e Resistência à Compressão

Analisando os resultados de todos os ensaios de absorção de água, massa específica aparente e resistência à compressão, observou-se que havia uma correlação entre estas características. Os valores apresentados nos gráficos à seguir foram obtidos dos 4 estudos de variáveis de fabricação realizados.

A Figura 5.21 mostra que há uma relação perfeitamente linear entre a absorção de água e massa específica aparente dos blocos. Os blocos com menor massa específica aparente possuem maior absorção de água, devido à menor porosidade do material.

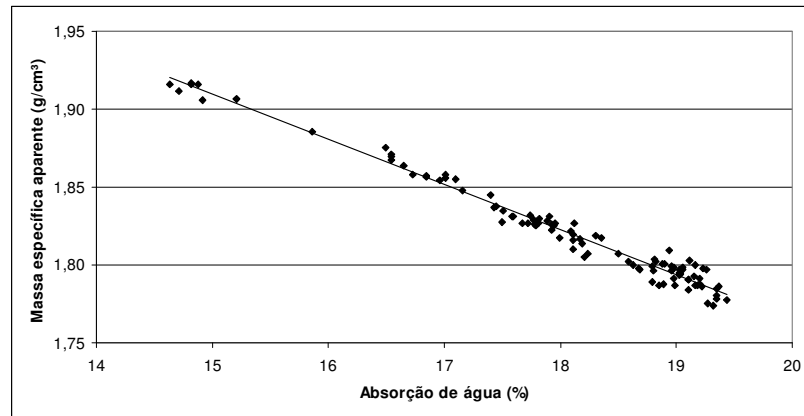


Figura 5.21 – Relação entre absorção de água e massa específica aparente

A Figura 5.22 e Figura 5.23 mostram, respectivamente, as relações entre absorção de água e resistência à compressão, e, massa específica aparente e resistência à compressão. Apesar dos valores se apresentarem bastante dispersos, verifica-se que blocos com menor absorção de água e maior massa específica possuem maior resistência à compressão. Estas correlações, se analisadas separadamente para cada uma das 4 variáveis de fabricação estudadas, apresentam-se bastante lineares.

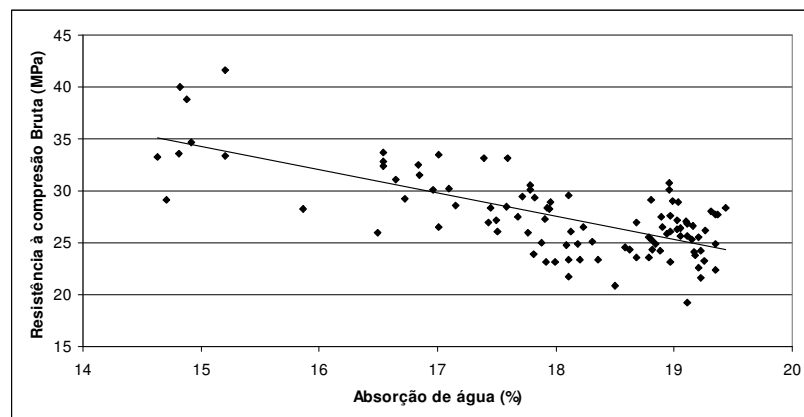


Figura 5.22 – Relação entre absorção de água e resistência à compressão

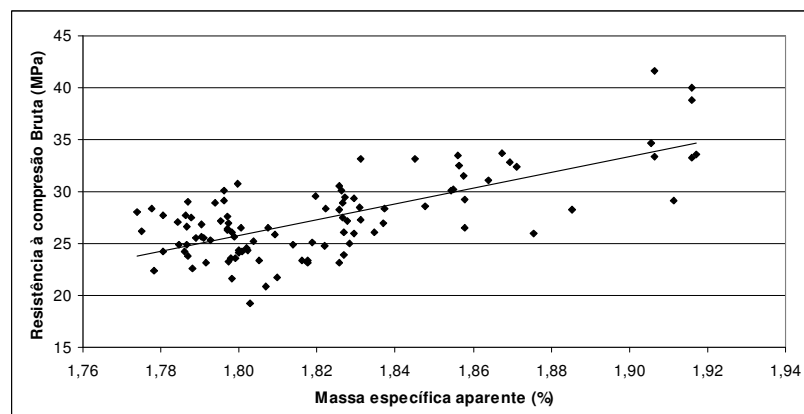


Figura 5.23 – Relação entre massa específica aparente e resistência à compressão

5.2. INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DOS BLOCOS

5.2.1. Resistência à Compressão das Unidades

Para cada geometria de blocos estudada, 10 corpos de prova foram submetidos aos ensaios de caracterização física e mecânica. Na Tabela 5.5 são apresentados os resultados médios obtidos dos ensaios e na Tabela 5.6 são apresentados os resultados da análise estatística de comparação de médias dos ensaios de resistência à compressão.

Tabela 5.5 – Características dos blocos com diferentes geometrias

		Geometria dos blocos			
		A	B	C	D
Absorção de água (%)	Média	16,02	15,07	15,63	15,23
	CV	1,97%	3,23%	1,61%	3,13%
Massa específica aparente (g/cm ³)	Média	1,853	1,877	1,884	1,890
	CV	0,54%	0,95%	0,46%	0,78%
Área líquida (cm ²)	Média	18,80	20,86	17,76	20,69
	CV	0,32%	0,71%	0,43%	0,52%
Resistência à compressão na área bruta (MPa)	Média	26,57	33,55	27,39	30,22
	CV	12,48%	8,94%	9,42%	18,91%
Resistência à compressão na área líquida (MPa)	Média	51,34	58,49	56,37	53,30
	CV	12,38%	8,83%	9,39%	19,06%

Como pode ser observado na Tabela 5.6, não há diferença significativa entre a resistência à compressão na área líquida dos blocos, e, portanto não se pode considerar que há influência do fator geometria, entre as 4 estudadas.

Por outro lado, pode ser observado ainda na Tabela 5.6, que há uma diferença significativa entre a resistência à compressão na área bruta dos blocos com 4 geometrias diferentes.

A análise de variâncias dos pares mostrou que há diferença significativa apenas entre as geometrias A e B, e, entre as geometrias B e C. Não há diferença significativa entre as geometrias A e C, entre a geometria D e todas as demais.

Tabela 5.6 – Análise de variância da resistência à compressão dos blocos

Geometria dos Blocos				F	F _{crít}	Conclusão
A	B	C	D			
Resistência à compressão na área bruta						
X	X	X	X	6,71	2,88	há ≠
X	X			23,21	4,45	há ≠
X		X		0,37	4,45	não há ≠
X			X	2,74	4,49	não há ≠
	X	X		24,41	4,41	há ≠
	X		X	2,61	4,45	não há ≠
		X	X	2,01	4,45	não há ≠
Resistência à compressão na área líquida						
X	X	X	X	1,98	2,88	não há ≠

O bloco com a geometria B apresentou resistência à compressão na área bruta 26,3% maior do que o bloco com a geometria A, e, 22,5% maior do que o com a geometria C. Estes resultados ocorrem devido às unidades com geometria B possuírem uma área líquida maior que aquelas com geometrias A (11,0%) e C (17,5%), e muito próxima à geometria D. As geometrias A e C também possuem áreas líquidas muito próximas, o que justifica que tivessem resistências à compressão próximas, não considerando a influência do fator geometria.

Os resultados dos testes de variância da geometria D, porém, não se apresentaram conforme esperado. Este bloco possui uma área líquida consideravelmente maior que os com geometrias A (10,0%) e C (16,5%), e a resistência média obtida foi 13,7% maior que a da geometria A e 10,3% maior que a da C. Estes resultados podem ser devido a grande variabilidade dos resultados dos blocos D.

Durante os ensaios de compressão dos blocos com geometria D, observou-se que a forma de ruptura dos mesmos era diferente do padrão apresentados pelos demais blocos. Estes blocos trincavam exatamente no meio, ao longo do rasgo central. Durante os testes de ajuste de forma, para esta geometria, observou-se que, após o processo de secagem, surgiam fissuras nas paredes laterais no ponto onde se encontra o rasgo. Posteriormente estas trincas foram eliminadas, aumentando o tempo de secagem ao ar livre, porém isto é um indicativo de que pode ter sido gerado um ponto de fraqueza na região do rasgo, motivo pelo qual estes rompiam exatamente nesta região durante o ensaio de compressão. Em função disto, alguns blocos apresentaram resistência à compressão muito inferior à média, gerando um coeficiente de variação alto.

Os resultados parecem indicar que, para a resistência à compressão das unidades, mais do que a forma da geometria dos blocos, é importante a área líquida do mesmo.

5.2.2. Resistência à Compressão dos Prismas

Para cada geometria de blocos estudada, 6 unidades de controle foram submetidos aos ensaios de caracterização física e mecânica. Na Tabela 5.7 são apresentados os resultados médios obtidos dos ensaios.

Tabela 5.7 – Características dos blocos utilizados na moldagem dos prismas

		Geometria dos blocos			
		A	B	C	D
Absorção de água (%)	Média	16,70	16,27	16,26	18,85
	CV	2,70%	0,58%	2,61%	2,33%
Massa específica aparente (g/cm ³)	Média	1,860	1,862	1,870	1,870
	CV	0,69%	0,19%	0,67%	0,77%
Área líquida (cm ²)	Média	18,70	20,92	17,50	20,60
	CV	0,82%	0,32%	0,58%	0,61%
Resistência à compressão na área bruta (MPa)	Média	26,03	33,27	24,92	30,12
	CV	10,53%	9,15%	9,28%	8,38%
Resistência à compressão na área líquida (MPa)	Média	50,52	57,80	51,34	52,75
	CV	8,99%	11,32%	7,86%	8,80%

A argamassa utilizada para a moldagem dos prismas foi a do tipo (ii) da norma britânica, cujo traço em volume é 1:1/2:4,5. Foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, e submetidos ao ensaio de compressão. A resistência à compressão média obtida foi 6,84 MPa, com coeficiente de variação de 7,76%.

Foram moldados 6 prismas de 3 blocos para cada geometria de blocos estudada, e submetidos ao ensaio de resistência à compressão. Os resultados médios obtidos são apresentados na Tabela 5.8, com os correspondentes fatores de eficiência em relação aos blocos. Para o cálculo da resistência à compressão na área líquida, considerou-se a área líquida média obtida dos blocos de controle.

Tabela 5.8 – Resistência à compressão média dos prismas, em MPa

GEOMETRIA		Blocos		Argamassa	Prismas		Eficiência
		Área bruta	Área líquida		Área bruta	Área líquida	
A	Média	26,03	50,52	6,84	14,75	28,60	0,57
	CV	10,53%	10,71%	7,76%	16,31%	16,31%	
B	Média	33,27	57,80	6,84	15,72	27,30	0,47
	CV	9,15%	9,21%	7,76%	13,97%	13,97%	
C	Média	24,92	51,34	6,84	11,87	24,45	0,48
	CV	9,28%	9,48%	7,76%	7,45%	7,45%	
D	Média	30,12	52,75	6,84	16,58	29,03	0,55
	CV	8,38%	8,52%	7,76	9,83%	9,83%	

Os fatores de eficiência dos prismas com as geometrias B e C, com furos arredondados, apresentaram-se com valores muito próximos e inferiores aos dos prismas com as geometrias A e D, também muito próximos entre si. Pode-se afirmar portanto, que há influência da geometria na eficiência da resistência à compressão de prismas, sendo que blocos com furos quadrados ou retangulares tendem a apresentar maior eficiência que os de furos arredondados.

Na Tabela 5.9 são apresentados os resultados da análise estatística de comparação de médias dos ensaios de resistência à compressão.

Tabela 5.9 – Análise de variância da resistência à compressão dos prismas

Geometria dos Blocos				F	F _{crít}	Conclusão
A	B	C	D			
Resistência à compressão na área bruta						
X	X	X	X	6,30	3,16	há ≠
X	X			0,48	5,12	não há ≠
X		X		6,32	5,32	há ≠
X			X	2,25	5,12	não há ≠
	X	X		13,33	5,12	há ≠
	X		X	0,59	4,96	não há ≠
		X	X	33,18	5,12	há ≠
Resistência à compressão na área líquida						
X	X	X	X	1,88	3,16	não há ≠

Como pode ser observado, da mesma forma como ocorreu com os resultados dos ensaios de blocos, não há diferença significativa entre a resistência à compressão na

área líquida dos prismas, e, portanto não se pode considerar que houve influência do fator geometria, entre as 4 estudadas.

Pode ser observado ainda na Tabela 5.9, que há uma diferença significativa entre a resistência à compressão na área bruta dos prismas com 4 geometrias diferentes.

Na análise de variâncias dos pares, houve diferença significativa apenas entre as geometrias C e todas as demais. As demais geometrias, A, B e D, não apresentaram diferenças significativas entre si.

Diferente do comportamento dos ensaios dos blocos, com exceção da geometria C, não se verificou a influência da área líquida na resistência à compressão na área bruta dos prismas. O fato dos prismas de geometria C apresentarem resistência à compressão inferior às demais geometrias talvez seja devido à esta possuir menor espessura de paredes.

Todos os prismas apresentaram ruptura frágil, com surgimento de trincas verticais e ruptura característica por tração na região próxima da junta de argamassa.

5.2.3. Resistência à Compressão de Paredinhas

Para cada geometria de blocos estudada, 12 unidades de controle de blocos inteiros e 12 unidades de controle de meio-blocos foram submetidos aos ensaios de caracterização física e mecânica. Na Tabela 5.10 são apresentados os resultados médios obtidos dos ensaios.

A argamassa utilizada para a moldagem das paredinhas foi a do tipo (ii) da norma britânica, e foram moldados 4 corpos de prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura para cada geometria, e submetidos ao ensaio de compressão. Foram moldadas 4 paredinhas para cada geometria de blocos estudada, e submetidas ao ensaio de resistência à compressão.

Os resultados médios obtidos são apresentados na Tabela 5.11, com os correspondentes fatores de eficiência em relação aos blocos. Para o cálculo da resistência à compressão na área líquida, considerou-se a área líquida média obtida dos blocos de controle mais a área das juntas verticais de argamassa.

Os módulos de elasticidade longitudinal das paredinhas são apresentados na Tabela 5.12.

Tabela 5.10 – Características dos blocos utilizados na moldagem das paredinhas

		Geometria dos blocos							
		A	B	C	D	MA	MB	MC	MD
Absorção de água (%)	Média	16,17	16,21	16,77	15,40	16,60	16,31	17,07	15,87
	CV	1,28%	2,57%	1,85%	0,86%	2,34%	2,30%	2,60%	1,80%
Massa específica aparente (g/cm ³)	Média	1,861	1,859	1,860	1,881	1,854	1,857	1,851	1,877
	CV	0,39%	0,71%	0,48%	0,27%	0,66%	0,70%	0,73%	0,51%
Área líquida (cm ²)	Média	18,67	20,78	17,63	20,34	9,91	11,42	9,86	9,80
	CV	0,36%	0,37%	0,44%	0,30%	0,45%	0,49%	0,61%	0,44%
Resistência à compressão na área bruta (MPa)	Média	24,20	28,96	23,41	29,89	27,05	31,27	36,64	32,96
	CV	8,99%	11,32%	7,86%	8,80%	21,33%	9,73%	15,76%	12,70%
Resistência à compressão na área líquida (MPa)	Média	46,69	50,23	48,14	52,78	47,29	47,39	64,27	57,62
	CV	8,99%	11,29%	7,91%	8,78%	21,28%	9,61%	15,76%	12,67%

Tabela 5.11 – Resistência à compressão média das paredinhas

GEOMETRIA		Blocos		Argamassa	Paredinhas		Eficiência
		Área bruta	Área líquida		Área bruta	Área líquida	
A	Média	24,20	46,69	6,56	8,81	16,84	0,36
	CV	8,99%	8,99%	25,14%	7,35%	7,35%	
B	Média	28,96	50,23	7,84	10,85	18,72	0,37
	CV	11,32%	11,32%	13,39%	6,19%	6,19%	
C	Média	23,41	48,14	6,82	8,95	18,07	0,38
	CV	7,86%	7,86%	8,48%	10,21%	10,21%	
D	Média	29,98	52,78	6,18	12,42	21,87	0,41
	CV	8,80%	8,80%	18,10%	16,86%	16,86%	

Tabela 5.12 – Módulos de elasticidade das paredinhas

Geometria	A	B	C	D
E _{PA} (MPa)	4.724	3.714	4.570	5.334

Os fatores de eficiência das paredinhas obtidos com as geometrias A, B e C foram muito próximos, e, a eficiência das paredinhas com a geometria D mostrou-se um pouco superior às demais.

Na Tabela 5.13 são apresentados os resultados da análise estatística de comparação de médias dos ensaios de resistência à compressão.

Tabela 5.13 – Análise de variância da resistência à compressão das paredinhas

Geometria dos Blocos				F	F _{crít}	Conclusão
A	B	C	D			
Resistência à compressão na área bruta						
X	X	X	X	7,72	3,49	há ≠
X	X			19,05	5,99	há ≠
X		X		0,06	5,99	não há ≠
X			X	10,84	5,99	há ≠
	X	X		11,17	5,99	há ≠
	X		X	2,05	5,99	não há ≠
		X	X	9,22	5,99	há ≠
Resistência à compressão na área líquida						
X	X	X	X	3,71	3,49	há ≠
X	X			4,90	5,99	não há ≠
X		X		1,22	5,99	não há ≠
X			X	6,70	5,99	há ≠
	X	X		0,36	5,99	não há ≠
	X		X	2,67	5,99	não há ≠
		X	X	3,41	5,99	não há ≠

Como pode ser observado há diferença significativa entre a resistência à compressão na área bruta das paredinhas, e, os resultados das análises par à par foram semelhantes aos obtidos nos ensaios com blocos, ou seja, as geometrias com áreas líquidas semelhantes não apresentaram diferença significativa e geometrias com áreas líquidas distintas apresentaram diferença significativa de resistência à compressão na área bruta.

As paredinhas com geometria B forneceram resistência 23,2% maior que as de geometria A e 21,2% maior que as de C. As paredinhas de geometria D apresentaram o melhor desempenho, com resistência 40,1% maior que a geometria A e 38,8% maior que a C.

Pode ser observado ainda na Tabela 5.13, que há uma diferença significativa entre a resistência à compressão na área líquida das paredinhas com 4 geometrias diferentes.

Na análise de variâncias dos pares, houve diferença significativa apenas entre as geometrias A e D. Os demais pares não apresentaram diferenças significativas entre si. As paredinhas com geometria D obtiveram resistência 29,9% superior às de geometria A.

Observando os valores médios das resistências à compressão na área líquida, verifica-se que as pareдинhas de geometrias B e C, com furos arredondados, obtiveram desempenho superior às de geometria A, com furos retangulares, porém, estatisticamente as diferenças não são significativas. Da mesma forma, a geometria D apresentou desempenho superior às geometrias B e C, mas também não significativa estatisticamente.

Em todos os ensaios de compressão das pareдинhas houve o surgimento e desenvolvimento de trincas verticais em torno de 70% à 80% da carga última, com ruptura característica por tração na região próxima da junta de argamassa entre a primeira e segunda fiadas de blocos.

Conforme era esperado inicialmente, as pareдинhas com blocos de geometria D apresentaram desempenho superior as demais na resistência à compressão, tanto na área bruta como na área líquida, assim como melhor eficiência em relação à resistência dos blocos. Isto, devido ao fato de haver total superposição dos septos, proporcionado pelos dois septos centrais, o que não ocorre com as demais geometrias. Este fenômeno somente pode ser analisado em ensaios de paredes, devido ao assentamento contrafiado dos blocos, e a utilização de unidades em escala reduzida mostrou-se uma ferramenta adequada para a viabilidade deste estudo.

5.2.4. Influência do fator de escala reduzido: comparação com trabalhos publicados

Os ensaios realizados neste trabalho com modelos em escala reduzida, produzidos em laboratório, mostraram-se muito eficientes para o estudo de variáveis de fabricação de blocos cerâmicos, e, para avaliar o comportamento da alvenaria com estes blocos.

O controle de qualidade que se obtém produzindo blocos cerâmicos em laboratório permite obter resultados com baixos coeficientes de variação, e com repetição dos mesmos em diferentes produções. Este fato possibilita a obtenção de conclusões muito confiáveis quando do estudo das diversas variáveis de fabricação, mesmo quando se trabalha com limites muito estreitos e resultados médios muito próximos. Dentre os resultados de caracterização física e mecânica dos blocos produzidos neste trabalho, sob diversas variáveis de fabricação, apenas os resultados de

retração de queima apresentaram uma variabilidade alta. Isto ocorreu devido aos índices de retração de queima obtidos serem muito baixos e a precisão utilizada nas medidas das unidades não foi a adequada.

Os ensaios realizados com blocos, prismas e paredinhas, utilizando 4 diferentes geometrias de blocos, também apresentaram-se satisfatórios, conforme previsto inicialmente. Blocos e paredinhas com áreas líquidas distintas forneceram resistência à compressão na área bruta claramente distintos, e, as geometrias com áreas líquidas muito próximas não apresentaram resistências significativamente diferentes. Apenas os ensaios de prismas não mostraram o mesmo comportamento.

A influência da geometria dos blocos na resistência à compressão dos mesmos não foi observada. Diversas pesquisas realizadas anteriormente com blocos cerâmicos de vedação (GOMES, 1986 e ABIKO, 1994) concluíram que blocos com furos quadrados apresentam melhor desempenho à compressão que blocos com furos redondos, e, comportamento semelhante para blocos estruturais era esperado.

Comparando os resultados obtidos neste trabalho com os obtidos em estudos com blocos em escala real, observa-se valores e comportamentos muito semelhantes. GOMES (1986) realizou ensaios de compressão em prismas e paredes não armadas de 1,20 m de largura e 2,60 m de altura, utilizando blocos cerâmicos estruturais, com o propósito de fornecer subsídios para projeto, determinando a resistência à compressão de paredes construídas com determinados produtos cerâmicos. Os blocos cerâmicos estruturais utilizados pelo referido autor são mostrados na Figura 5.24, e os resultados de resistência à compressão estão apresentados na Tabela 5.14.

Tabela 5.14 – Resistências médias obtidas por GOMES (1986)

Dimensões	f_{CB} (MPa)	f_{CA} (MPa)	f_{CP} (MPa)	f_{CPA} (MPa)	E_{PA} (MPa)
19x19x39 cm	7,9	13,4	5,2	4,0	3.000
14x19x39 cm	11,4	8,3	6,8	4,4	5.200
14x19x29 cm	11,5	9,2	7,4	4,5	4.600
9x19x39 cm	7,6	11,1	7,0	4,6	4.000
f_{CB} – resistência à compressão dos blocos f_{CP} – resistência à compressão dos prismas E_{PA} – módulo de elasticidade das paredes					
f_{CA} – resistência à compressão da argamassa f_{CPA} – resistência à compressão das paredes					

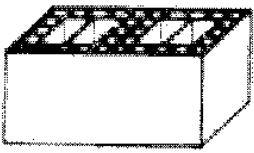
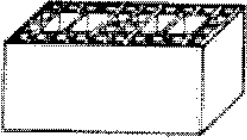

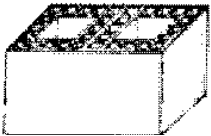
 BLOCO 19x19x39	$A_{br} = 741,0 \text{ cm}^2$ $A_{lq} = 282,0 \text{ cm}^2$ $f_{CB} = 7,9 \text{ MPa}$
 BLOCO 14x19x39	$A_{br} = 546,0 \text{ cm}^2$ $A_{lq} = 235,0 \text{ cm}^2$ $f_{CB} = 11,4 \text{ MPa}$
 BLOCO 9x19x39	$A_{br} = 351,0 \text{ cm}^2$ $A_{lq} = 160,5 \text{ cm}^2$ $f_{CB} = 7,6 \text{ MPa}$
 BLOCO 14x19x29	$A_{br} = 406,0 \text{ cm}^2$ $A_{lq} = 164,0 \text{ cm}^2$ $f_{CB} = 11,5 \text{ MPa}$

Figura 5.24 – Blocos cerâmicos utilizados por GOMES (1986)

MENDES (1998) estudou o comportamento da alvenaria de blocos cerâmicos grauteados e não grauteados, verificando a resistência de prismas submetidos à compressão axial. Os blocos cerâmicos utilizados foram fornecidos pela mesma empresa que forneceu a argila e os moldes utilizados neste trabalho, sendo que a geometria daqueles blocos foi a referência dos blocos de geometria A aqui utilizados, assim como todo o processo de fabricação, incluindo a temperatura de queima, foi baseado no processo utilizado por esta empresa.

Os traços usados por MENDES (1998) para a moldagem dos prismas foram os tipo (i) e (iii) da norma britânica BS 5628 cujas proporções são, respectivamente, 1:1/4:3 e 1:1:6. A Tabela 5.15 mostra a resistência à compressão obtida para estas argamassas.

Tabela 5.15 – Resistência à compressão média das argamassas utilizadas por MENDES (1998)

Tipo de argamassa	Traço em volume	Resistência à compressão
(i)	1:1/4:3	19,86 MPa
(iii)	1:1:6	6,47 MPa

Dos dois tipos de argamassa utilizados para a moldagem dos prismas não grauteados, a argamassa do tipo (iii) foi a que obteve resistência à compressão mais próxima à usada neste trabalho para a moldagem dos prismas e das paredinhas, as quais foram, respectivamente, 6,84 MPa e 6,56 MPa.

Os resultados dos ensaios de compressão dos blocos e prismas moldados com argamassa tipo (i) e (iii) obtidos por MENDES (1998) e os obtidos neste trabalho com os blocos de geometria A, estão apresentado na Tabela 5.16.

A Tabela 5.17 mostra os resultados obtidos neste trabalho para os blocos e paredinhas de geometria A.

Tabela 5.16 – Comparação com os resultados obtidos por MENDES (1998)

Tipo de argamassa	BLOCOS			PRISMAS		
	Absorção de água (%)	Resistência à compressão na área bruta (MPa)	Resistência à compressão na área líquida (MPa)	Resistência à compressão na área bruta (MPa)	Eficiência	Módulo de elasticidade (MPa)
Resultados obtidos com os blocos utilizados por MENDES						
(i)	15,61	22,89	43,73	12,56	0,55	5.249
(iii)	15,61	22,89	43,73	8,11	0,35	4.508
Resultados obtidos com os blocos de geometria A						
(ii)	16,70	26,03	50,52	14,75	0,57	-

Tabela 5.17 – Resultados obtidos com as paredinhas de blocos de geometria A

Tipo de argamassa	BLOCOS			PAREDINHAS		
	Absorção de água (%)	Resistência à compressão na área bruta (MPa)	Resistência à compressão na área líquida (MPa)	Resistência à compressão na área bruta (MPa)	Eficiência	Módulo de elasticidade (MPa)
(ii)	16,17	24,20	46,69	8,81	0,36	4.724

Analisando os resultados apresentados na Tabela 5.16, verifica-se que os blocos utilizados por MENDES e os blocos de geometria A apresentaram absorção de água e resistência à compressão praticamente iguais. Os prismas moldados pelo referido autor com a argamassa tipo (i) também apresentaram resistência à compressão e um fator de eficiência muito semelhantes aos valores obtidos neste trabalho, porém a resistência à compressão da argamassa foi muito maior. Os prismas moldados com a argamassa tipo (iii), que teve resistência próxima à argamassa aqui utilizada, apresentaram menor resistência à compressão que os valores aqui obtidos, e também eficiência 39% menor.

Analisando ainda os resultados obtidos com as paredinhas, Tabela 5.17, é interessante observar que a resistência à compressão, o fator de eficiência e o módulo de elasticidade obtidos são semelhantes aos resultados dos prismas com argamassa do tipo (iii) obtidos por MENDES.

Há, portanto, uma influência do fator de escala nos resultados de resistência à compressão de prismas. Isto também é observado na resistência da argamassa tipo (ii) utilizada, que apresentou a mesma resistência da argamassa tipo (iii) utilizada por MENDES, teoricamente menos resistente. Deve-se lembrar que, devido ao fator de escala, a areia utilizada neste trabalho possui um módulo de finura inferior à areia utilizada pelo autor acima citado. Mas de uma forma geral, os modelos em escala reduzida mostram-se bastante eficientes para avaliar o comportamento mecânico de prismas e paredes de blocos cerâmicos.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho consistiu em desenvolver procedimentos de fabricação de blocos cerâmicos estruturais em laboratório, estudando a influência de diversas variáveis de fabricação nas características físicas e mecânicas dos mesmos, assim como avaliar a precisão de testes em modelos de elementos de alvenaria em escala reduzida.

Os procedimentos de fabricação de blocos em laboratório foram descritos, observando-se os cuidados e controles a serem tomados em cada etapa do processo produtivo. As variáveis de fabricação estudadas foram: tempo de queima, temperatura de queima, umidade de extrusão da argila e quantidade de blocos no forno durante o processo de queima.

Para avaliar a influência do fator de escala reduzida no comportamento da alvenaria de blocos cerâmicos, foi realizado um estudo de caso no qual utilizou-se diferentes geometrias de blocos, e sua influência nos resultados de resistência à compressão das unidades, prismas e paredinhas foi analisada. Foram realizadas comparações com resultados de pesquisas realizadas com unidades em escala natural.

As principais conclusões obtidas são descritas abaixo:

- A etapa mais importante do processo de fabricação de blocos cerâmicos é a da preparação da matéria prima. A falta de homogeneidade da massa cerâmica causa problemas em todas as demais etapas do processo e, portanto, é de vital importância que se promova uma correta dosagem, mistura, moagem e homogeneização das matérias primas. Na natureza se encontra uma variedade muito grande de argilas com diferentes características e a escolha adequada das argilas a serem usadas e seu proporcionamento são fundamentais para se obter as características desejadas do produto acabado.
- É muito importante que se determine a umidade ideal de extrusão da massa cerâmica, pois esta tem uma influência significativa nos processos de moldagem, secagem e queima e, por consequência, nas características do produto final. Os estudos realizados variando-se a umidade de extrusão mostraram que esta tem uma

influência significativa em todos os ensaios de caracterização física e mecânica dos blocos realizados.

- Dentro dos limites utilizados, observou-se que quanto menor a umidade da argila, melhores foram as características dos blocos, apresentando menor absorção de água, maior massa específica aparente e maior resistência à compressão. Reduzindo a umidade, diminui a quantidade de vazios deixados pela água que evapora durante a secagem, reduzindo a absorção de água e proporcionando um mais compacto e mais resistente. É claro que o limite de plasticidade da argila deve ser respeitado. Argilas com umidades abaixo deste limite não são moldáveis.
- A umidade da argila é a variável mais difícil de ser controlada no processo de fabricação em laboratório. Após determinar e corrigir a umidade, ocorre a perda da mesma durante o manuseio da argila para a homogeneização e durante a moagem no laminador. Há ainda perda de umidade durante a extrusão, pois, como o processo não é contínuo, a argila fica estacionada em contato com o ar enquanto aguarda ser introduzida na extrusora. Portanto, deve-se ter o cuidado de não utilizar quantidades muito grandes de argila de uma só vez, para evitar que esta fique parada em contato como ar livre durante muito tempo, provocando variação de umidade no decorrer da moldagem. Grandes quantidades de argila também dificultam a homogeneização da umidade.
- O correto projeto, regulagem e posicionamento das boquilhas (moldes) se mostraram de grande importância no processo de moldagem por extrusão. Diversos defeitos nas peças moldadas foram identificados devido à má regulagem e posicionamento irregular das boquilhas.
- Em todos os ensaios de retração linear de queima realizados, obteve-se valores diferentes para cada uma das dimensões dos blocos (largura, altura e comprimento), e este é um fato que deve ser considerado no dimensionamento das boquilhas.
- Durante o processo de secagem, o principal cuidado a ser tomado é na determinação da curva de secagem. A secagem deve ser inicialmente lenta, com temperaturas baixas, aumentando gradativamente até a temperatura de 110 °C. Os blocos devem ter sua umidade totalmente eliminada antes de serem encaminhados ao processo de queima.

- No processo de queima, os fatores mais importantes observados foram a velocidade de crescimento da temperatura, o tempo de patamar de queima, a temperatura de patamar de queima e a quantidade de blocos no forno.
- Os testes com diferentes tempos de queima mostraram que há uma influência significativa desta variável na perda ao fogo, na absorção de água, na massa específica aparente e na área líquida dos blocos. Para maiores tempos de queima, houve maior perda ao fogo e se obteve blocos com maior massa específica aparente, menor absorção de água e menor área líquida. As variações mais significativas ocorreram quando do aumento de 1 hora para 2 horas de queima.
- Nos resultados de resistência à compressão, houve aumento de resistência à medida que se elevou a queima de 1 hora para 3 horas, porém, para 4 horas de queima obteve-se a menor resistência. Recomenda-se que se realizem estudos com tempos de queima maiores para verificar se há redução da resistência à compressão.
- A temperatura de queima demonstrou ter influência significativa nos resultados de perda ao fogo, retração linear de queima, absorção de água, área líquida, massa específica aparente e resistência à compressão dos blocos.
- Dentro dos limites estudados, há um aumento da perda ao fogo e da retração linear de queima com o aumento da temperatura de queima. A absorção de água e a área líquida diminuem com o aumento da temperatura. A massa específica aparente e a resistência à compressão apresentaram um crescimento exponencial à medida que foi elevada a temperatura de queima.
- Pode-se afirmar que aumentando a temperatura de queima dos blocos, ocorrem transformações químicas e físicas da massa cerâmica que provocam a perda e retração da massa, com conseqüente redução da área líquida, acompanhada de redução dos poros vazios, tornando o material mais compacto, com menor absorção de água e maior resistência mecânica.
- Os testes realizados com diferentes quantidades de blocos no forno mostraram que há uma influência desta variável na retração linear de queima, absorção de água, massa específica aparente, área líquida e resistência à compressão dos blocos. À medida que se aumentou o número de blocos no forno, houve um crescimento nos resultados de retração, massa específica e de resistência, e, um decréscimo da absorção de água e área líquida. Um importante fator observado foi o aumento da variabilidade dos resultados de retração de queima, absorção e massa específica

aparente para maiores quantidades de blocos no forno, e, portanto, recomenda-se não queimar grandes quantidades de blocos de uma só vez.

- No estudo de caso realizado com 4 geometrias diferentes, os resultados dos ensaios de unidades, prismas e paredinhas mostraram que não há diferença de resistência à compressão na área líquida entre blocos com furos retangulares (geometria A) e com furos arredondados (geometrias B e C).
- Quando analisada a resistência à compressão na área bruta, verificou-se nos ensaios de unidades e paredinhas que blocos com maiores áreas líquidas resultaram em maior resistência. Isto, porém, não foi evidenciado nos ensaios com prismas.
- Nos ensaios com paredinhas, os blocos com septo central duplo apresentaram uma eficiência superior às demais geometrias, ficando evidente que a superposição total dos septos em paredes contrafiadas resulta em melhor desempenho à compressão.
- Para a determinação da resistência à compressão de unidades, assim como analisar seu comportamento, a utilização de modelos em escala reduzida mostra-se bastante confiável. A comparação com estudos que utilizaram unidades com as mesmas características geométricas mostrou que os valores obtidos são muito próximos.
- Já nos ensaios de prismas, em comparações com resultados de ensaios em escala real, observou-se que os modelos em escala reduzida podem ser utilizados para analisar o comportamento mecânico, porém, numericamente, pelo menos no caso em estudo, houve diferença entre os valores.
- Recomenda-se que sejam realizados estudos para verificar a influência do módulo de finura da areia, quando da utilização de modelos reduzidos, na resistência das argamassas e, conseqüentemente, na resistência de prismas e paredes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **ABBOUD, B. E.; HAMID, A. A.; HARRIS, H. G.** Small-scale modeling of concrete block masonry structures. *ACI Structural Journal*, pág. 145-155, março-abril/1990.
2. **ABIKO, A. K.** A influência do formato de blocos cerâmicos em sua resistência mecânica. *Cerâmica*, nº 170, pág. 61-68, fevereiro/1994.
3. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.** ASTM E 447-84 – Compressive strength of prisms. In: *Annual Book of ASTM Standards*, Philadelphia, 1987.
4. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** NBR 5712 – Bloco vazado modular de concreto. Rio de Janeiro, 1982.
5. _____. NBR 6136 – Bloco vazado de concreto simples para alvenaria estrutural. Rio de Janeiro, 1994.
6. _____. NBR 6457 – Amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.
7. _____. NBR 6459 – Solo – determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.
8. _____. NBR 6461 – Bloco cerâmico para alvenaria – verificação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1983.
9. _____. NBR 7171 – Bloco cerâmico para alvenaria. Rio de Janeiro, 1983.
10. _____. NBR 7180 – Solo – determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.
11. _____. NBR 7181 – Solo – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

12. _____. NBR 7184 – Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1992.
13. _____. NBR 7217 – Agregados – Determinação da composição granulométrica dos agregados. Rio de Janeiro, 1982.
14. _____. NBR 7219 – Agregados – determinação do teor de material pulverulento nos agregados. Rio de Janeiro, 1987.
15. _____. NBR 7220 – Agregados – determinação de impurezas orgânicas e húmicas em agregados. Rio de Janeiro, 1987.
16. _____. NBR 7251 – Agregados – determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.
17. _____. NBR 8042 – Bloco cerâmico para alvenaria – formas e dimensões. Rio de Janeiro, 1992.
18. _____. NBR 8043 – Bloco cerâmico portante para alvenaria – determinação da área líquida. Rio de Janeiro, 1983.
19. _____. NBR 8215 – Prismas de blocos vazados de concreto simples para alvenaria estrutural – preparo e ensaio à compressão. Rio de Janeiro, 1983.
20. _____. NBR 8522 – Concreto – determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão deformação. Rio de Janeiro, 1984.
21. _____. NBR 8949 – Paredes de alvenaria estrutural – ensaio à compressão simples. Rio de Janeiro, 1985.
22. _____. NBR 8798 – Execução e controle de obras em alvenaria estrutural de blocos vazados de concreto. Rio de Janeiro, 1985.
23. _____. NBR 9776 – Agregados – Determinação da massa específica dos agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro, 1982.
24. _____. NBR 12118 – Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – determinação da absorção de água, do teor de umidade e da área líquida. Rio de Janeiro, 1991.

25. **BAKER, L. R.** Manufacture and testing of model brickwork wind panels. Proceedings, Structural Models Conference, School of Architectural Science, University of Sydney, 1972.
26. **BRITISH STANDARDS INSTITUTION.** BS 1200 - Sands for mortar for plain and reinforced brickwork, blockwork, blockwalling and masonry. London, 1976.
27. _____. BS 5628: Part 1: Structural use of unreinforced Mansory. London, 1992.
28. _____. BS 5628: Part 2: Structural use of reinforced and prestressed Mansory. London, 1985.
29. _____. BS 5628: Part 3: Material and components, design and workmanship. London, 1985.
30. **DURÃES, F. D.** Como iniciar uma indústria de tijolos (Parte II). Cerâmica, nº 165, pág. 22A-29A, setembro/1985-A.
31. **DURÃES, F. D.** Como iniciar uma indústria de tijolos (Parte III). Cerâmica, nº 166, pág. 15A-18A, outubro/1985-B.
32. **FILIPPI, C.** A preparação da argila e extrusão podem evitar a laminação. Cerâmica, nº 144, pág. 27A-30A, dezembro/1981.
33. **FIORATO, A. E.; SOZEN, M. A.; GAMBLE, W.L.** An investigation of the interaction of reinforced concrete frames with masonry filler walls, Civil Engeneering Studies, Structural Research Series nº 370, University off Illinois, Urbana, 1970.
34. **FRANCO, L. S.** O desenvolvimento de processos construtivos em alvenaria estrutural. In: Anais do III Simpósio de Desempenho de Materiais e Componentes de Construção Civil, Florianópolis, 1991.

35. **FUSCO, P. B.; CAMACHO, J. S.** Contribuição ao estudo do efeito de cargas lentas aplicadas em alvenaria estrutural de blocos cerâmicos em diferentes escalas. Proceedings, 5th Internacional Seminar on Structural Masonry for Developing Countries, pág. 137-145, 1994.
36. **FUSCO, P. B.; CAMACHO, J. S.** Influência do graute na resistência à compressão de prismas de blocos cerâmicos em diferentes escalas. Proceedings, 5th Internacional Seminar on Structural Masonry for Developing Countries, pág. 168-175, 1994.
37. **GOMES, N. S.** A resistência à compressão simples e a estabilidade de paredes não armadas construídas com tijolos ou blocos cerâmicos. Cerâmica, nº 194, pág. 59-68, março/1986.
38. **HAMID, A. A.; ABBOUD, B. D.; HARRIS, H. G.** Direct modeling of concrete block masonry under shear and in-plane tension. Journal of Testing and Evaluation, V. 14, nº 2, pág. 112-121, 1986.
39. **HAMID, A. A.; CHANDRAKEERTHY, S. R. S.** Compressive strengt of partially grouted concrete masonry using small scale wall elements. TMS Journal, pág. 75-85, agosto/1992.
40. **HARRIS, H. G.; BECICA, I. J.** Direct small scale modeling of concrete masonry. Advances in Civil Engineeering Through Engineeing Mechanics, American Society of Civil Engineeers, New York, pág. 101-104, 1977.
41. **HENDRY, A. W.; MURTHY, C. K.** Comparative tests on one-third and one-sixth scale model brickwork piers and walls. Proceedings, British Ceramic Society, nº 4, pág. 21-32, julho/1965.
42. **KHOO, C. L.; HENDRY, A. W.** Biaxial compression-tension strength tests on one-third scale model bricks. The British Ceramic Research Association, Technical Note 163, novembro/1970.
43. **LOPES, C.** Princípios básicos para regulagem de boquilhas de extrusão. Cerâmica, nº 153, pág. 371-382, setembro/1982.

44. **MENDES, R. J. K.** Resistência à compressão de alvenarias de blocos cerâmicos – Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFSC. 1998.
45. **NEGREIROS, F. T.** Fabricação de material cerâmico com argila e cinzas de carvão mineral - Dissertação de mestrado - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFSC. 1993.
46. **OLIVEIRA, S. M.** Avaliação de tijolos e blocos cerâmicos do estado de Santa Catarina - Dissertação de mestrado - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFSC. 1993.
47. **PRACIDELLI, S.** Defeitos dos tijolos e telhas. *Cerâmica*, nº 128, pág. 31A-33A, agosto/1980.
48. **PRACIDELLI, S.** Queima das peças de cerâmica vermelha ou estrutural. *Cerâmica*, nº 135, pág. 34A-35A, março/1981.
49. **PRACIDELLI, S.** Estudos de argilas e de massa de telhas. *Cerâmica*, nº 176, pág. 201-206, agosto/1984.
50. **ROMAN, H. R.** Características físicas e mecânicas que devem apresentar os tijolos e blocos cerâmicos para alvenarias de vedação e estrutural. In: *Anais do III Simpósio de Desempenho de Materiais e Componentes de Construção Civil*. Florianópolis, 1991-A.
51. **ROMAN, H. R.** Argamassas de assentamento para alvenarias. In: *Anais do III Simpósio de Desempenho de Materiais e Componentes de Construção Civil*. Florianópolis, 1991-B.
52. **SANTOS, P. S.** Ciência e tecnologia de argilas, vol. 1. Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo, 1989.
53. **SECRETARIA DE ESTADO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA, DAS MINAS E ENERGIA.** Diagnóstico do Setor de Cerâmica Vermelha em Santa Catarina. Florianópolis, SC, 1990.

54. **SINHA, B. P.; MAURENBRECHER, A. H. P.; HENDRY, A. W.** Model and full scale tests on a five-story cross-wall structure under lateral loading. Proceedings, 2nd Internacional Brick Masonry Conference, Stoke-on-Trent, pág. 201-208, 1970.
55. **VILLAR, V. S.** Perfil e perspectivas da indústria cerâmica vermelha do sul de Santa Catarina - Dissertação de mestrado - Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – UFSC. 1988.
56. **VOGT, H.** Consideration and investigations on de basic principle of model testes in brickwork and mansory structures. Library Communication nº 932, Building Research Station, Garston, Watford, 1956.

ANEXOS

Tabela A. 1 – Características físicas e mecânicas dos blocos – resultados médios para diferentes tempos de queima

	Tempo de patamar de queima, em horas			
	1	2	3	4
Umidade de extrusão da argila (U_{EA}) = 32,56 %				
Temperatura de patamar de queima = 930 °C				
N	7	7	7	7
Dimensões após queima, em mm				
C	87,48	87,38	87,33	87,30
L	41,45	41,46	41,44	41,43
A	56,94	56,95	56,84	56,87
Ensaio de retração linear de secagem (R_S), (%)				
C	6,18	6,15	6,16	6,14
L	6,73	6,94	6,86	6,94
A	7,50	7,58	7,41	7,43
Ensaio de retração linear de queima (R_Q), (%)				
C	1,10	1,24	1,32	1,37
L	1,73	1,59	1,59	1,69
A	0,92	0,89	1,14	1,12
Outros ensaios de caracterização				
U_{EB} (%)	32,09	32,09	32,05	32,04
PF (%)	6,92	6,96	6,97	7,07
AA (%)	19,27	19,07	18,96	18,94
ME_A (g/cm ³)	1,783	1,791	1,795	1,797
A_{Liq} (cm ²)	18,78	18,69	18,70	18,66
RC_B (MPa)	25,72	26,98	27,49	25,65

N – n.º de corpos de prova

C – comprimento

L – largura

A – altura

U_{EA} – umidade de extrusão da argila

U_{EB} – umidade de extrusão dos blocos

PF – perda ao fogo

AA – absorção de água

ME_A – massa específica aparente

A_{Liq} – área líquida

RC_B – resistência à compressão bruta

Tabela A. 2 – Características físicas e mecânicas dos blocos – resultados médios para diferentes temperaturas de queima

	Temperatura de patamar de queima, °C				
	910	930	950	970	990
Umidade de extrusão da argila (U_{EA}) = 32,75 %					
Tempo de patamar de queima = 2 horas					
N	6	6	6	6	6
Dimensões após queima, em mm					
C	87,73	87,48	87,18	86,63	85,90
L	41,58	41,42	41,28	41,00	40,67
A	57,05	56,92	56,80	56,42	56,03
Ensaio de retração linear de secagem (R_S), (%)					
C	5,57	5,61	5,54	5,57	5,56
L	6,49	6,31	6,34	6,45	6,38
A	7,08	7,10	7,00	7,11	7,05
Ensaio de retração linear de queima (R_Q), (%)					
C	1,05	1,32	1,73	2,33	3,12
L	1,62	2,20	2,48	3,07	3,90
A	0,81	1,07	1,33	1,91	2,64
Outros ensaios de caracterização					
U_{EB} (%)	31,67	31,59	31,63	31,65	31,64
PF (%)	6,90	6,93	7,01	7,11	7,05
AA (%)	18,67	18,14	17,57	16,68	14,97
ME_A (g/cm ³)	1,799	1,812	1,832	1,864	1,911
A_{Liq} (cm ²)	18,69	18,61	18,42	18,21	17,89
RC_B (MPa)	24,19	23,83	27,92	32,10	37,02

N – n.º de corpos de prova

C – comprimento

L – largura

A – altura

U_{EA} – umidade de extrusão da argila

U_{EB} – umidade de extrusão dos blocos

PF – perda ao fogo

AA – absorção de água

ME_A – massa específica aparente

A_{Liq} – área líquida

RC_B – resistência à compressão bruta

Tabela A. 3 – Características físicas e mecânicas dos blocos – resultados médios para diferentes patamares de umidade da argila

	Umidade média de extrusão dos blocos, (%)				
	34,41	32,84	31,90	31,47	30,33
Umidade inicial de extrusão da argila (U_{EA}) = 35,61 %					
Temperatura de patamar de queima = 930 °C					
Tempo de patamar de queima = 2 horas					
N	6	6	6	6	6
Dimensões após queima, em mm					
C	86,60	86,88	87,23	87,23	87,30
L	40,85	40,97	41,05	40,97	41,05
A	56,32	56,43	56,60	56,67	56,77
Ensaio de retração linear de secagem (R_S), (%)					
C	6,65	6,29	5,94	5,77	5,36
L	7,66	7,14	7,08	6,84	6,72
A	8,01	7,50	7,21	7,00	6,51
Ensaio de retração linear de queima (R_Q), (%)					
C	1,27	1,44	1,26	1,41	1,52
L	1,84	2,11	2,18	2,50	2,49
A	0,94	1,23	1,14	1,13	1,22
Outros ensaios de caracterização					
PF (%)	7,11	7,16	7,09	7,15	7,13
AA (%)	19,29	18,41	17,90	17,87	17,14
ME_A (g/cm ³)	1,784	1,811	1,825	1,828	1,850
A_{Liq} (cm ²)	18,31	18,41	18,44	18,47	18,45
RC_B (MPa)	25,16	25,42	28,11	27,78	30,34

N – n.º de corpos de prova

C – comprimento

L – largura

A – altura

U_{EA} – umidade de extrusão da argila

U_{EB} – umidade de extrusão dos blocos

PF – perda ao fogo

AA – absorção de água

ME_A – massa específica aparente

A_{Liq} – área líquida

RC_B – resistência à compressão bruta

Tabela A. 4 – Características físicas e mecânicas dos blocos – resultados médios para diferentes quantidades de blocos no forno

	Quantidade de blocos no forno		
	10	30	50
Umidade de extrusão da argila (U_{EA}) = 32,05 %			
Temperatura de patamar de queima = 930 °C			
Tempo de patamar de queima = 2 horas			
N	5	5	5
Dimensões após queima, em mm			
C	87,72	87,64	86,76
L	41,56	41,02	40,62
A	57,16	56,88	56,28
Ensaio de retração linear de secagem (R_S), (%)			
C	5,59	5,65	5,55
L	7,08	7,34	7,16
A	6,99	6,86	6,96
Ensaio de retração linear de queima (R_Q), (%)			
C	1,19	1,26	2,25
L	1,09	2,19	3,24
A	0,59	1,15	2,12
Outros ensaios de caracterização			
U_{EB} (%)	31,01	30,98	30,78
PF (%)	7,13	7,15	7,18
AA (%)	19,14	17,85	15,68
ME_A (g/cm ³)	1,801	1,828	1,889
A_{Liq} (cm ²)	18,70	18,53	18,15
RC_B (MPa)	22,85	26,82	29,19

N – n.º de corpos de prova

C – comprimento

L – largura

A – altura

U_{EA} – umidade de extrusão da argila

U_{EB} – umidade de extrusão dos blocos

PF – perda ao fogo

AA – absorção de água

ME_A – massa específica aparente

A_{Liq} – área líquida

RC_B – resistência à compressão bruta

Tabela A. 5 – Características físicas e mecânicas dos blocos utilizados nos ensaios de compressão de unidades – resultados médios

	Geometria dos blocos			
	A	B	C	D
Umidade de extrusão da argila (U_{EA}) = 31,83 %				
Tempo de patamar de queima = 2 horas				
Temperatura de patamar de queima = 930 °C				
N	10	10	10	10
Dimensões após queima, em mm				
C	87,50	87,61	87,81	87,10
L	41,53	41,52	41,64	41,91
A	57,08	56,96	57,00	57,15
Ensaio de retração linear de secagem (R_S), (%)				
C	6,10	5,81	5,70	6,32
L	6,77	7,05	6,43	6,43
A	7,38	7,40	7,40	6,99
Ensaio de retração linear de queima (R_Q), (%)				
C	0,98	1,16	1,04	1,11
L	1,41	1,58	1,56	1,48
A	0,77	1,05	0,90	1,06
Outros ensaios de caracterização				
U_{EB} (%)	30,00	29,21	28,64	28,67
PF (%)	5,97	6,02	6,04	6,09
AA (%)	16,02	15,07	15,63	15,23
ME_A (g/cm ³)	1,853	1,877	1,884	1,890
A_{Liq} (cm ²)	18,80	20,86	17,76	20,69
RC_B (MPa)	26,57	33,55	27,39	30,22

N – n.º de corpos de prova

C – comprimento

L – largura

A – altura

U_{EA} – umidade de extrusão da argila

U_{EB} – umidade de extrusão dos blocos

PF – perda ao fogo

AA – absorção de água

ME_A – massa específica aparente

A_{Liq} – área líquida

RC_B – resistência à compressão bruta

Tabela A. 6 – Características físicas e mecânicas dos blocos utilizados na moldagem dos prismas – resultados médios

	Geometria dos blocos			
	A	B	C	D
U _{EA} (%)	30,92		31,53	
Tempo de patamar de queima = 2 horas				
Temperatura de patamar de queima = 930 °C				
N	6	6	6	6
Dimensões após queima, em mm				
C	87,54	87,83	87,30	86,77
L	41,42	41,38	41,29	41,58
A	57,13	57,02	56,63	57,10
Ensaio de retração linear de secagem (R _S), (%)				
C	5,97	5,68	6,53	6,75
L	6,97	7,07	7,65	7,43
A	7,16	7,11	8,05	7,21
Ensaio de retração linear de queima (R _Q), (%)				
C	1,04	1,05	1,03	1,05
L	1,56	1,66	1,37	1,44
A	0,65	0,98	0,82	0,91
Outros ensaios de caracterização				
U _{EB} (%)	30,10	29,42	30,47	29,90
PF (%)	5,89	5,92	8,99	6,00
AA (%)	16,70	16,27	16,26	15,85
ME _A (g/cm ³)	1,860	1,862	1,870	1,870
A _{Líq} (cm ²)	18,70	20,92	17,50	20,60
RC _B (MPa)	26,03	33,27	24,92	30,12

N – n.º de corpos de prova

C – comprimento

L – largura

A – altura

 U_{EA} – umidade de extrusão da argila U_{EB} – umidade de extrusão dos blocos

PF – perda ao fogo

AA – absorção de água

 ME_A – massa específica aparente A_{Liq} – área líquida RC_B – resistência à compressão bruta

Tabela A. 7 – Características físicas e mecânicas dos blocos de geometria A e MA utilizados na moldagem das paredinhas – resultados médios

	1ª PRODUÇÃO		2ª PRODUÇÃO	
	Geometria dos blocos			
	A	MA	A	MA
U _{EA} (%)	31,36		31,47	
Tempo de patamar de queima = 2 horas				
Temperatura de patamar de queima = 930 °C				
N	6	6	6	6
Dimensões após queima, em mm				
C	87,47	41,75	87,33	41,73
L	41,23	41,53	41,18	41,54
A	56,93	57,31	56,87	57,31
Ensaio de retração linear de secagem (R _S), (%)				
C	6,05	5,85	6,31	6,05
L	7,26	6,55	7,55	6,99
A	7,15	6,48	7,50	6,77
Ensaio de retração linear de queima (R _Q), (%)				
C	0,92	1,12	0,91	1,09
L	1,47	1,11	1,30	0,86
A	0,78	0,66	0,73	0,66
Outros ensaios de caracterização				
U _{EB} (%)	29,95	29,81	30,56	29,87
PF (%)	6,01	5,97	5,94	5,91
AA (%)	16,13	16,76	16,22	16,44
ME _A (g/cm ³)	1,865	1,850	1,858	1,857
A _{Líq} (cm ²)	18,69	9,92	18,65	9,91
RC _B (MPa)	24,92	28,93	23,49	25,17

N – n.º de corpos de prova

C – comprimento

L – largura

A – altura

U_{EA} – umidade de extrusão da argila

U_{EB} – umidade de extrusão dos blocos

PF – perda ao fogo

AA – absorção de água

ME_A – massa específica aparente

A_{Liq} – área líquida

RC_B – resistência à compressão bruta

Tabela A. 8 – Características físicas e mecânicas dos blocos de geometria B e MB utilizados na moldagem das paredinhas – resultados médios

	1ª PRODUÇÃO		2ª PRODUÇÃO	
	Geometria dos blocos			
	B	MB	B	MB
U _{EA} (%)	31,64		31,35	
Tempo de patamar de queima = 2 horas				
Temperatura de patamar de queima = 930 °C				
N	6	6	6	6
Dimensões após queima, em mm				
C	87,61	41,75	87,40	41,63
L	41,24	41,59	41,13	41,42
A	56,94	57,23	56,78	57,08
Ensaio de retração linear de secagem (R _S), (%)				
C	5,94	5,95	6,28	6,38
L	7,21	6,48	7,71	7,21
A	7,11	6,60	7,82	7,32
Ensaio de retração linear de queima (R _Q), (%)				
C	0,95	1,34	0,95	1,26
L	1,67	0,95	1,54	1,02
A	0,88	0,75	0,89	0,74
Outros ensaios de caracterização				
U _{EB} (%)	30,61	29,97	30,04	29,76
PF (%)	5,62	5,62	5,81	5,85
AA (%)	16,58	16,50	15,84	16,12
ME _A (g/cm ³)	1,847	1,849	1,871	1,864
A _{Líq} (cm ²)	20,83	11,45	20,73	11,38
RC _B (MPa)	26,98	29,93	30,94	32,61

N – n.º de corpos de prova

C – comprimento

L – largura

A – altura

U_{EA} – umidade de extrusão da argila

U_{EB} – umidade de extrusão dos blocos

PF – perda ao fogo

AA – absorção de água

ME_A – massa específica aparente

A_{Liq} – área líquida

RC_B – resistência à compressão bruta

Tabela A. 9 – Características físicas e mecânicas dos blocos de geometria C e MC utilizados na moldagem das paredezinhas – resultados médios

	1ª PRODUÇÃO		2ª PRODUÇÃO	
	Geometria dos blocos			
	C	MC	C	MC
U _{EA} (%)	31,28		30,82	
Tempo de patamar de queima = 2 horas				
Temperatura de patamar de queima = 930 °C				
N	6	6	6	6
Dimensões após queima, em mm				
C	87,64	41,88	87,26	41,69
L	41,48	41,48	41,40	41,33
A	57,12	57,23	57,13	57,08
Ensaio de retração linear de secagem (R _S), (%)				
C	5,85	5,73	6,35	6,35
L	6,90	6,45	7,39	7,01
A	6,87	6,43	7,15	7,01
Ensaio de retração linear de queima (R _Q), (%)				
C	1,00	1,12	0,98	1,09
L	1,58	1,05	1,43	1,02
A	0,87	0,82	0,90	0,78
Outros ensaios de caracterização				
U _{EB} (%)	30,54	30,10	30,65	30,53
PF (%)	5,85	5,83	5,76	5,76
AA (%)	17,05	17,34	16,49	16,80
ME _A (g/cm ³)	1,852	1,842	1,868	1,859
A _{Líq} (cm ²)	17,69	9,91	17,57	9,82
RC _B (MPa)	22,69	38,72	24,01	34,56

N – n.º de corpos de prova

C – comprimento

L – largura

A – altura

U_{EA} – umidade de extrusão da argila

U_{EB} – umidade de extrusão dos blocos

PF – perda ao fogo

AA – absorção de água

ME_A – massa específica aparente

A_{Liq} – área líquida

RC_B – resistência à compressão bruta

Tabela A. 10 – Características físicas e mecânicas dos blocos de geometria D e MD utilizados na moldagem das paredinhas – resultados médios

	1ª PRODUÇÃO		2ª PRODUÇÃO	
	Geometria dos blocos			
	D	MD	D	MD
U _{EA} (%)	31,20		31,64	
Tempo de patamar de queima = 2 horas				
Temperatura de patamar de queima = 930 °C				
N	6	6	6	6
Dimensões após queima, em mm				
C	86,47	41,52	86,32	41,43
L	41,49	41,39	41,39	41,27
A	56,91	57,02	56,88	56,93
Ensaio de retração linear de secagem (R _S), (%)				
C	6,99	6,47	7,13	6,74
L	7,54	7,35	7,35	7,63
A	7,42	7,26	7,49	7,35
Ensaio de retração linear de queima (R _Q), (%)				
C	1,01	1,31	0,97	1,25
L	1,25	1,02	1,53	0,94
A	0,86	0,75	0,83	0,76
Outros ensaios de caracterização				
U _{EB} (%)	30,77	30,28	31,23	30,92
PF (%)	5,86	5,86	5,88	5,82
AA (%)	15,32	15,83	15,48	15,91
ME _A (g/cm ³)	1,885	1,878	1,877	1,875
A _{Líq} (cm ²)	20,37	9,83	20,30	9,78
RC _B (MPa)	30,08	33,25	29,89	32,67

N – n.º de corpos de prova

C – comprimento

L – largura

A – altura

U_{EA} – umidade de extrusão da argila

U_{EB} – umidade de extrusão dos blocos

PF – perda ao fogo

AA – absorção de água

ME_A – massa específica aparente

A_{Liq} – área líquida

RC_B – resistência à compressão bruta

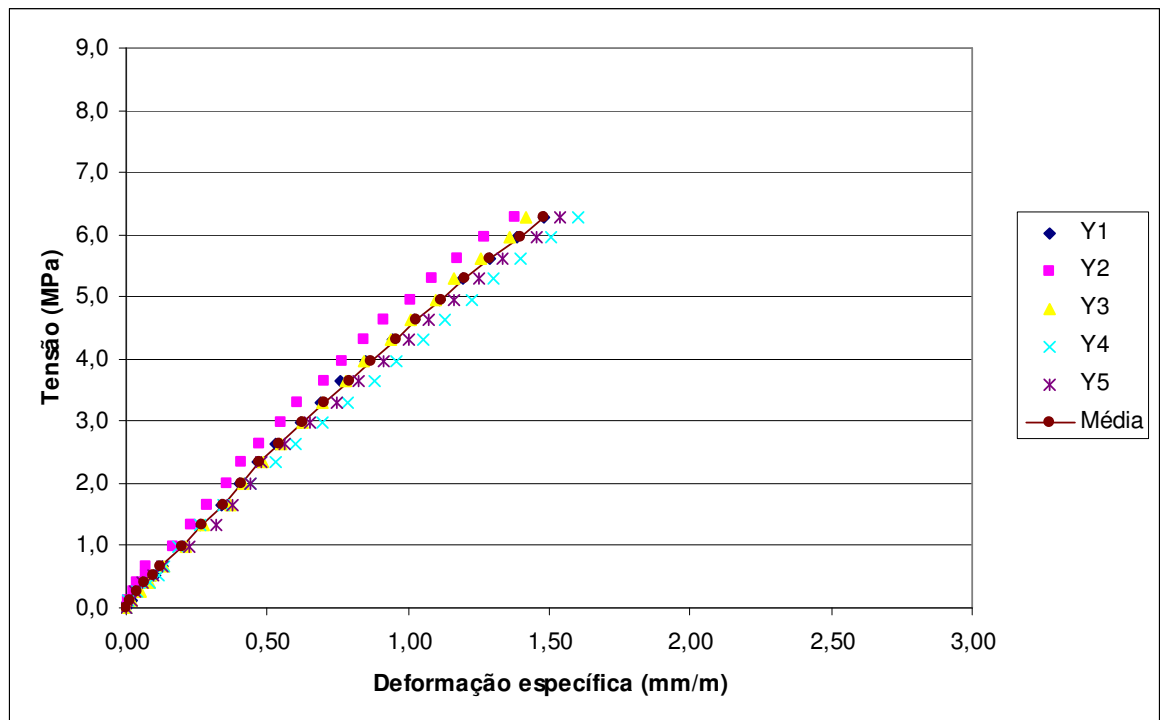


Figura A. 1 – Gráfico tensão x deformação nas bases de medida das paredinhas de geometria A

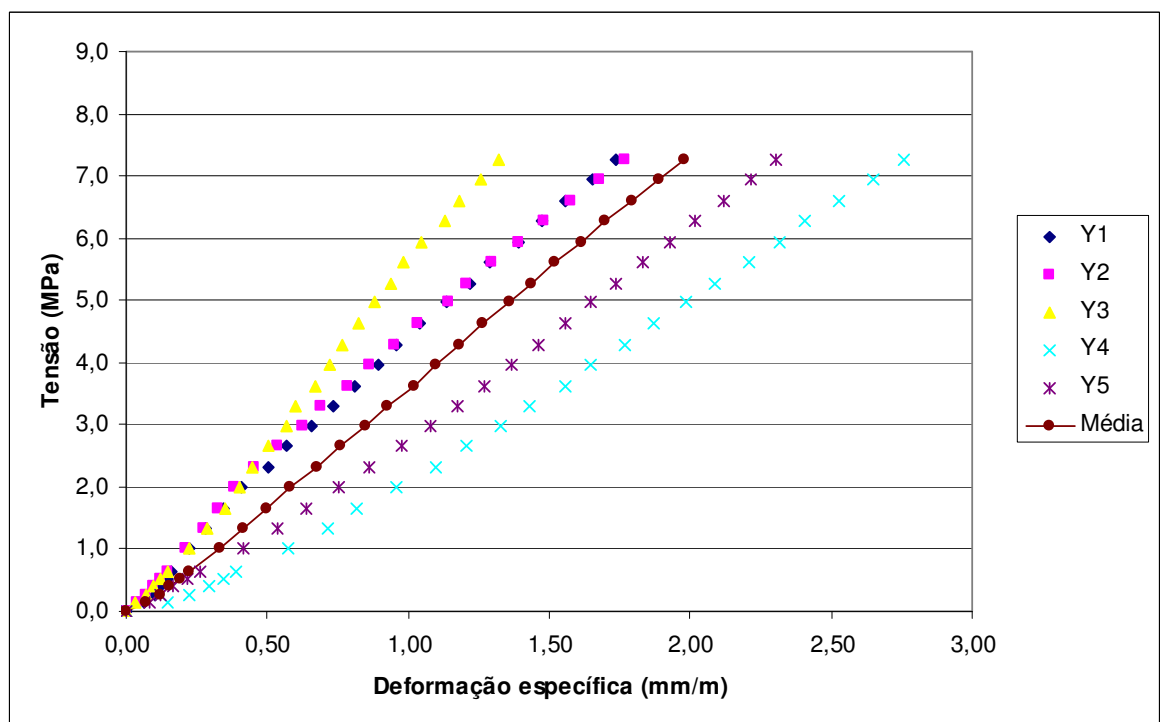


Figura A. 2 – Gráfico tensão x deformação nas bases de medida das paredinhas de geometria B

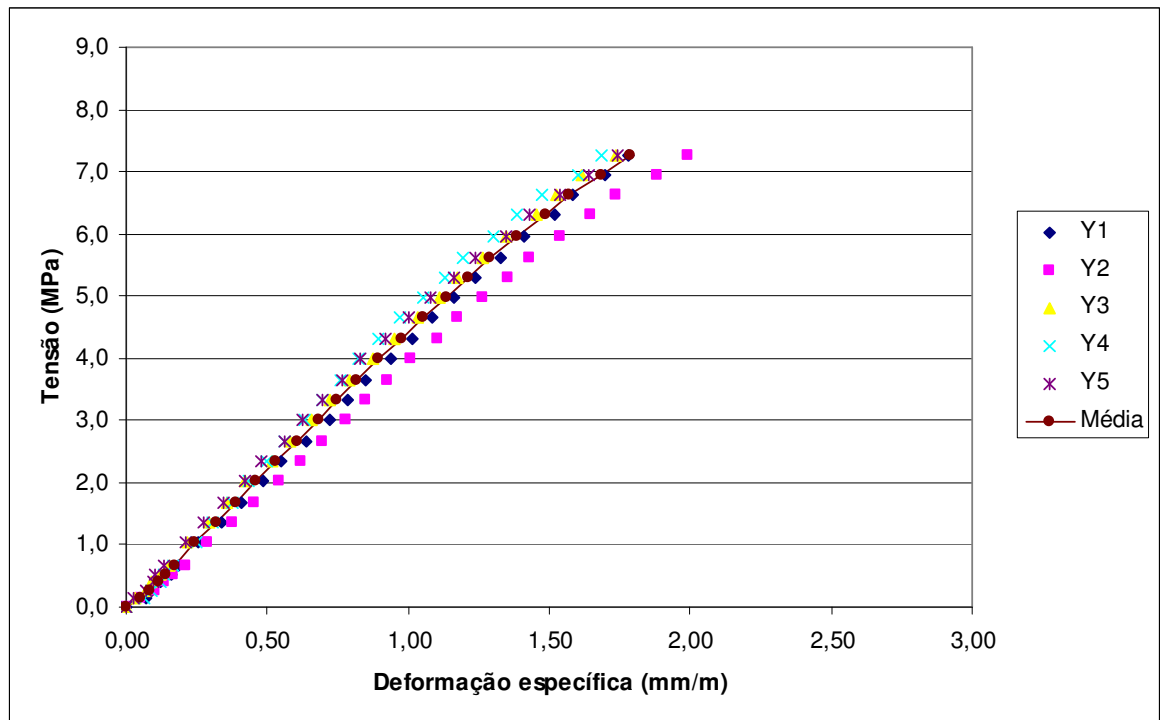


Figura A. 3 – Gráfico tensão x deformação nas bases de medida das parafusadas de geometria C

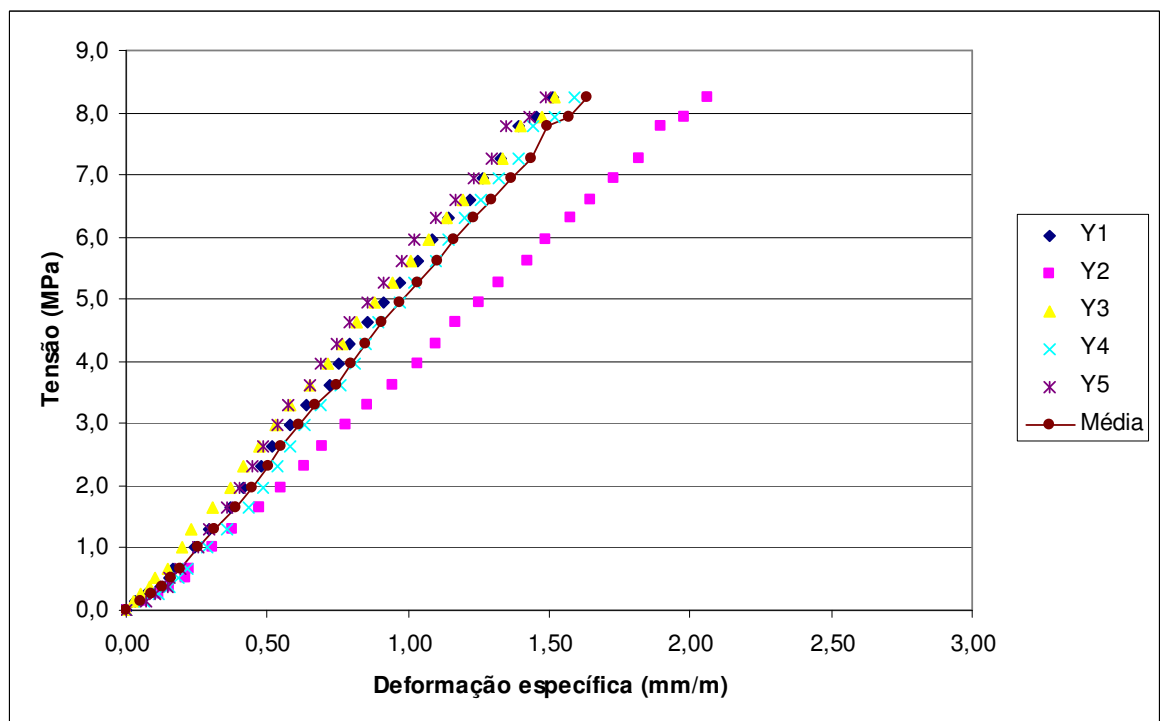


Figura A. 4 – Gráfico tensão x deformação nas bases de medida das parafusadas de geometria D